С. А. ШЕЛЕХОВ
Т. С. ШЕЛЕХОВА

РОЛЬГАНГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ СЕРИИ АР



С. А. ШЕЛЕХОВ,
Т. С. ШЕЛЕХОВА

●

РОЛЬГАНГОВЫЕ ЭЛЕКТРО-ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ АР



МОСКВА
«ЭНЕРГИЯ»
1977

6П2.1.081
Ш 42
УДК 621.313.333.2:62—83

Шелехов С. А. и Шелехова Т. С.

Ш 42 Рольганговые электродвигатели серии АР. М., Энергия», 1977.

184 с. с ил.

В книге рассматриваются основные особенности трехфазных асинхрониых рольганговых двигателей с короткозамкнутым ротором серии А^{Р}, Отражен многолетний опыт проектирования и исследования двигателей. Собран и обобщен матернал по техническим характеристикам. Предложена методика выбора рольганговых электродвигатепей. Даны рекомендацни по эксплуатации.

Книга предназначена для ннженерно-технических работников заводов тяжелого машиностроения, металлургичесих заводов и проектных организаций, занимеющихся выбором и эксплуатацией рольганговых двигателей. Книга будет полезной и для студентов вузов, специализирующихся по автоматизированному электроприводу и электрическим машинам.

Ш $\frac{30307\text{-}342}{051(01)\text{-}77}$ 267-77 6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для специфических условий прокатного производства на металлургических заводах ранее применялись только двигатели постоянного тока. Последние 20—30 лет все более широко используются асинхронные двигатели.

В разработку конструкции и теории рольганговых электродвигателей в СССР значительный вклад внесли Б. И. Кузнецов, Л. Л. Пантюхов, Н. А. Тищенко, М. А. Сонькин, С. Н. Вешеневский. Следует отметить работы иностранных авторов: В. Каухера, Н. Виклера, Б. Юрковича, И. Гака, В. Эбершпрехера, Х. Грайнера, В. Гелиаса, И. Хейдбредера.

Специальные асинхронные трехфазные короткозамкнутые двигатели для индивидуального привода роликов рольгангов имеют высокий начальный пусковой момент и мягкую механическую характеристику. Эти двигатели вследствие простоты и жесткости конструкции, высокой надежности и долговечности и несложного ухода применяются для привода роликов нереверсивных и реверсивных прокатных станов как холодной, так и горячей прокатки металла и для транспортных рольгангов. При необходимости регулирования частоты вращения двигателей их питание осуществляется от электромашинных или статических преобразователей, допускающих изменение частоты и напряжения. В настоящее время наиболее перспективными источниками переменной частоты являются статические преобразователи.

Рольганговые электродвигатели переменного тока выпускаются многими инофирмами: ББЦ (Швейцария, ФРГ); ОЭТ (Италия); АЭГ, «Демаг», «Бауэр» (ФРГ); БТ-Аш (Англия);

«Релианс Электрик» (США); ВЭМ (ГДР); «Раде Кончар» (Югославия); «Лерой» (Франция); АЦЭЦ (Бельгия); «Электрим» (Польша) и др.

В СССР потребность металлургической промышленности для индивидуального привода роликов рольгангов обеспечивается в основном рольганговыми электродвигателями серии АР, выпускаемыми заводом «Сибэлектромотор» по ГОСТ 10283-69.

При написании книги авторы ставили своей задачей показать основные особенности трехфазных асинхронных рольганговых электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии АР, используя многолетний опыт их проектирования, производства, исследования и эксплуатации.

Существует несколько путей получения небольшой частоты вращения роликов от двигателей переменного тока: применение многополюсных двигателей на промышленной частоте 50 Гц, двигателей с редукторами, двигателей с преобразователями частоты, двигателей с редукторами и преобразователями частоты. В книге дано экономическое сравнение различных способов получения низкой частоты вращения роликов с помощью приводов переменного тока.

Простой прокатного стана приносит большие убытки, поэтому для надежной и долговечной работы электродвигатели должны правильно выбираться и эксплуатироваться. В заключительной части книги предложена методика выбора рольганговых двигателей и даны рекомендации по их применению, эксплуатации и ремонту.

Авторы выражают благодарность кандидатам технических наук рецензенту Ю. В. Гаинцеву и редактору В. Я. Беспалову за сделанные ими ценные замечания.

Авторы будут признательны за все замечания и пожелания, направленные на улучшение книги.

Авторы

Глава первая

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РОЛЬГАНГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

1-1. НАЗНАЧЕНИЕ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РОЛЬГАНГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Трехфазные асинхронные рольганговые электродвигатели с короткозамкнутым ротором серии АР, соответствующие ГОСТ 10283-69, относятся к основному оборудованию прокатных станов на металлургических заводах и применяются в основном для одиночных роликов рольгангов. Однако эти двигатели из-за несложного ухода, высокой надежности и простоты конструкции нашли широкое применение не только для индивидуального привода роликов рольгангов (рольганги прокатных станов горячей и холодной прокатки металла, ролики транспортных рольгангов непрерывных заготовочных станов и транспортных рольгангов холодильников, ролики транспортных участков непрерывной разливки стали, роликов рольгангов участков термоотделений баллонных цехов), но и для механизмов, работающих на упор или срыв: ригели дверосъемных механизмов коксовых машин, выдвижные упоры для вагоноопрокидывателей, перекидные клапаны холодного и горячего дутья воздухонагревателей доменных печей, на шихтоподаче для забора агломерата, кокса и добавок и др.

В зависимости от режимов работы к двигателям предъявляются различные требования. Электродвигатели, служащие для привода роликов рабочих рольгангов, у которых направление вращения роликов изменяется с каждым пропуском, работают, главным образом, в режимах пусков и торможений при большом числе включений в час. В приводе транспортных рольгангов, ролики которых вращаются непрерывно с постоянной частотой вращения и лишь изредка реверсируются, электродвигателям приходится работать в основном в длительном режиме, преодолевая моменты сопротивления статической нагрузки.

Электродвигатели серии АР предназначены для следующих климатических условий:

а) умеренные климатические условия — окружающая температура +45°С (нормальное исполнение);

б) тропические условия — окружающая температура +45°С и относительная влажность 98% (тропическое исполнение).

По сравнению с ранее выпускавшимися сериями АЗР и МАР серия АР имеет ряд преимуществ.

1. Серия АР имеет вдвое большее количество типов машин, что облегчает выбор электродвигателей при проектировании приводов.

2. Диапазон частот вращения значительно расширен.

3. В отличие от электродвигателей серии АЗР, допускавших длительный режим работы в основном на холостом ходу, электродвигатели серии АР рассчитаны и для работы в длительном режиме под нагрузкой.

4. Серия АР выпускается в трех конструктивных исполнениях (кроме 8-го габарита, где только одно исполнение на лапах): АР — со станиной на лапах и горизонтальным валом (исполнение М100 по ГОСТ 2479-65); АРФ — со станиной без лап, с фланцем на подшипниковом щите и горизонтальным валом (исполнение М300 по ГОСТ 2479-65); АРК — со станиной без лап и с горизонтальным полым конусным валом. Серия АЗР имела только два конструктивных исполнения — на лапах и фланцевое.

5. В электродвигателях серии АР предусмотрена кремнийорганическая изоляция класса Н (допускается длительный нагрев обмотки статора до +180°С). В электродвигателях серии АЗР применялась изоляция класса В, а в МАР — класса А. Применение изоляции класса Н позволило:

а) сократить расходы активных и конструкционных материалов;

б) значительно увеличить «динамические постоянные», надежность в эксплуатации и увеличить срок службы, применить для тропического исполнения обмотки двигателей, предназначенных для умеренного климата;

в) значительно увеличить допустимое время нахождения двигателя в режиме короткого замыкания при номинальном напряжении.

Требования, предъявляемые к элементам привода в прокатных и в подобных им цехах как с электрической, так и с механической точек зрения, необычайно тяжелы. Кроме этих общих требований к рабочим и транспортным рольгангам с их индивидуальным приводом роликов предъявляются еще особые условия эксплуатации. Все эти особенности вытекают из широкого диапазона существующих режимов эксплуатации и нагрузки со всеми возможными вариантами, как, например, продолжительная работа, кратковременная и прерывистая работа, работа в режимах частых пусков, торможений и реверсов. Кроме того, электродвигатель должен соответствовать возможным во время эксплуатации перегрузкам, которые при заклинивании прокатываемого изделия могут привести к продолжительному режиму короткого замыкания электродвигателя при номинальном напряжении.

Электродвигатели серии АР 4—6-го габаритов без опасных последствий для изоляции выдерживают режим короткого замыкания, исходя из холодного состояния, при номинальных напряжении и частоте в течение не менее 10 мин, а машины 7-го и 8-го габаритов — не менее 7 мин.

При оценке особых условий эксплуатации рольгангов учитываются и весьма тяжелые окружающие условия. Электродвигатели часто подвергаются не только сильным механическим ударам и сотрясениям, но и сильному тепловому излучению раскаленного прокатываемого изделия, а также меняющимся воздействиям пыли и влажности.

Простой прокатных станов приносит большие убытки металлургическим предприятиям. Поэтому понятно требование к особо высокой надежности работы рольганговых двигателей.

1-2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АР

Рольганговый двигатель доказал свою работоспособность в тяжелых условиях эксплуатации. Постоянно ведется работа по усовершенствованию рольганговых двигателей.

Особенности конструкции машин этого типа обусловлены специфическими условиями их эксплуатации и тре-

бованиями, которые предъявляются к их характеристикам (высокий начальный пусковой момент, мягкая механическая характеристика, высокие динамические свойства, повышенные надежность и долговечность в работе, жесткость конструкции, тяжелые условия окружающей среды).

На рис. 1-1—1-8 показана конструкция рольганговых электродвигателей серии АР. В этой серии усилены подшипниковые узлы и рабочие концы валов.

Электродвигатели серии АР отличаются высокой прочностью конструкции и технологичностью изготовления.

Особое внимание уделено унификации узлов и деталей. Это позволило при меньших затратах технологически лучше оснастить производство и увеличить выпуск рольганговых двигателей в несколько раз.

Вся серия выполнена в пяти габаритах. Каждый габарит имеет две длины пакетов статоров и роторов. В габарите предусмотрены станины одной длины. С целью получения высоких динамических показателей, в частности для уменьшения потребляемой мощности во время частых пусков и торможений, внутренние диаметры статоров выбраны несколько меньшими, чем у двигателей общепромышленного исполнения, но длина пакетов при этом увеличена. Принятые длины пакетов допустимы благодаря достигнутому уровню технологии: возможности получения равномерного воздушного зазора по длине пакета, качественной заливке роторов, жесткости пакетов статоров.

Исполнение электродвигателей закрытое с естественным воздушным охлаждением через ребристые поверхности станин и щитов. Выбор для основного исполнения естественного воздушного охлаждения объясняется специфическими условиями их эксплуатации и прежде всего повторно-кратковременным режимом работы, при котором вентиляторы, насаженные на вал двигателя, малоэффективны, а применение независимой вентиляции требует дополнительных устройств и вносит элемент ненадежности.

Отличительной особенностью двигателей серии АР является, кроме того, увеличенный по сравнению с нормальными двигателями воздушный зазор, что дополнительно повлияло на увеличение их надежности и долговечности,

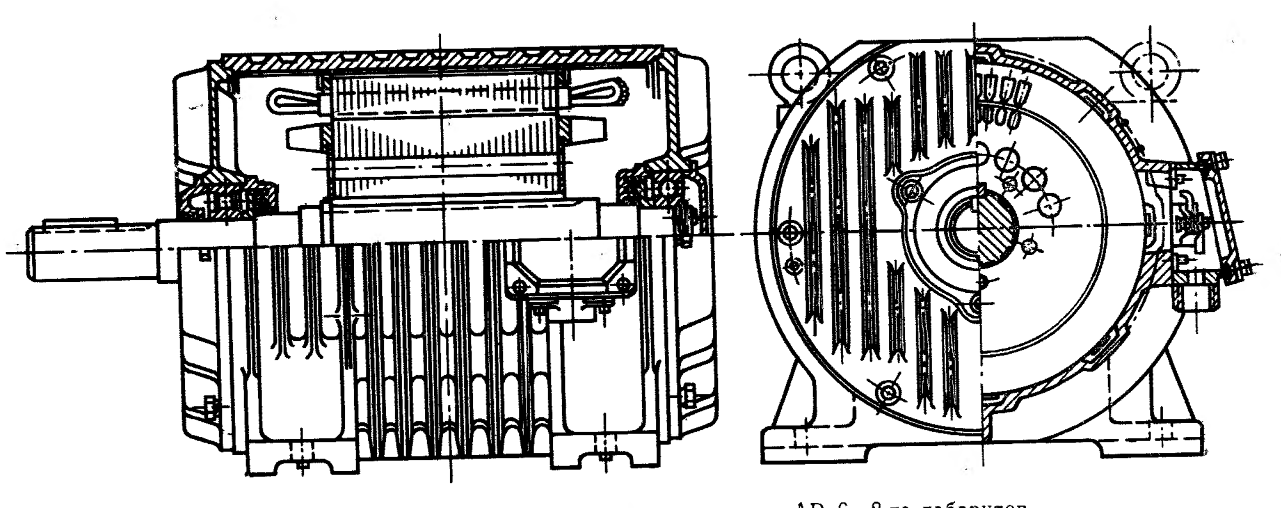


Рис. 1-1. Общий вид рольгангового двигателя типа АР 6—8-го габаритов.

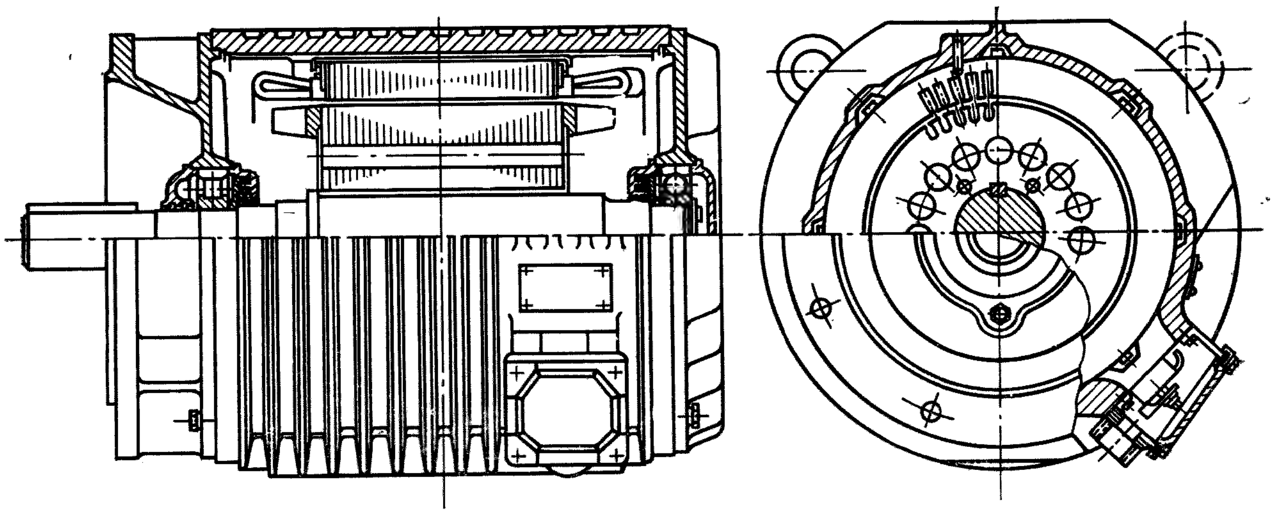


Рис. 1-2. Общий вид рольгангового электродвигателя типа АРФ 6 и 7-го габаритов.

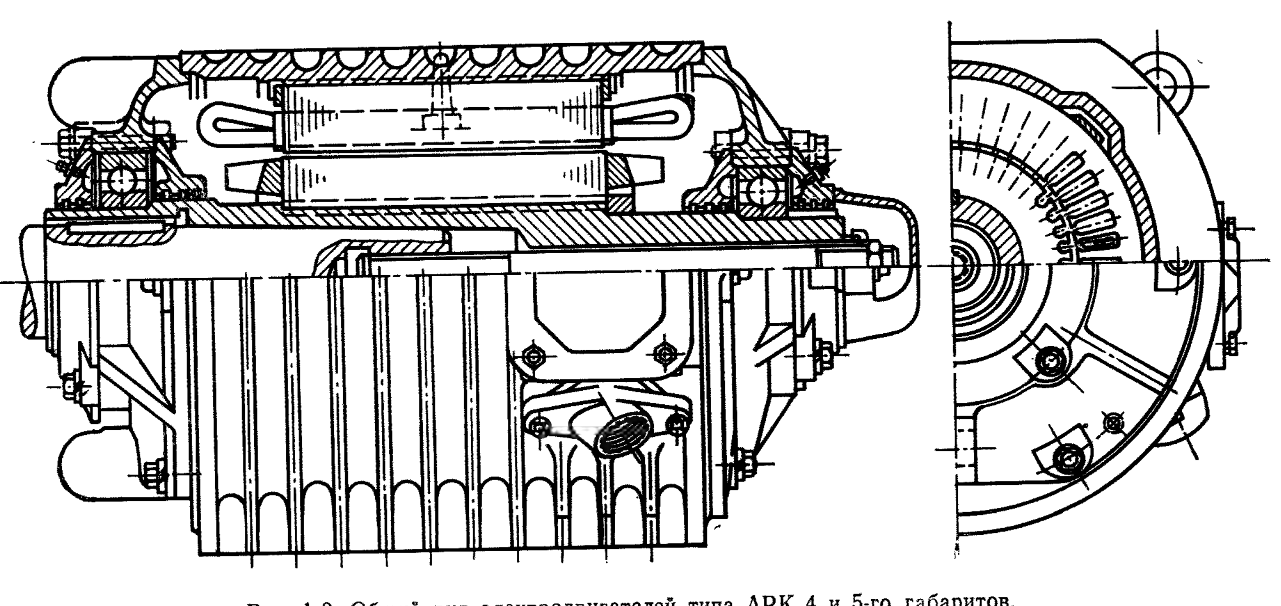


Рис. 1-3. Общий вид электродвигателей типа АРК 4 и 5-го габаритов.

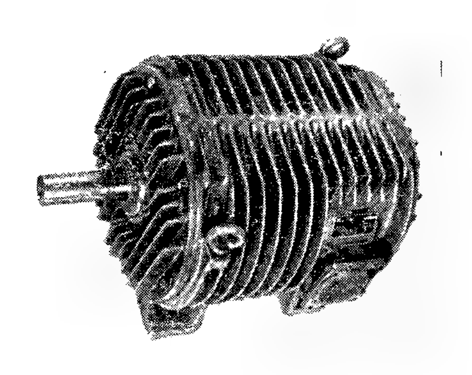


Рис. 1-4. Рольганговый электродвигатель типа АР 7-го габарита, исполнение М100.

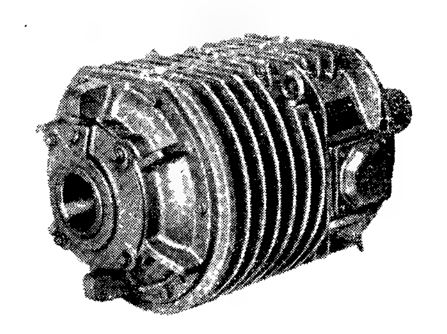


Рис. 1-5. Рольганговый электродвигатель серии АРК 5-го габарита (с полым конусным валом).

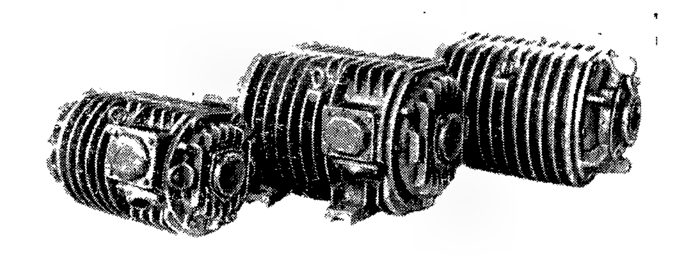


Рис. 1-6. Рольганговые электродвигатели серии АР.

Разработана модификация двигателей серии АРФВ 5-го и 6-го габаритов с водяным охлаждением подшипниковых щитов и станин. Такая модификация предназначена для рольгангов с интенсивной тепловой нагрузкой, а также для участков цехов с температурой окружающей среды +200°С (косые рольганги при шахматном расположении рабочих клетей, подводящие рольганги холодильников, печные рольганги и др.).

Подшипники двигателей защищены от попадания мелкой окалины, пыли и влаги.



Рис. 1-7. Рольганговый электродвигатель с водяным охлаждением типа АРФВ 6-го габарита. Вид со стороны свободного конца вала.

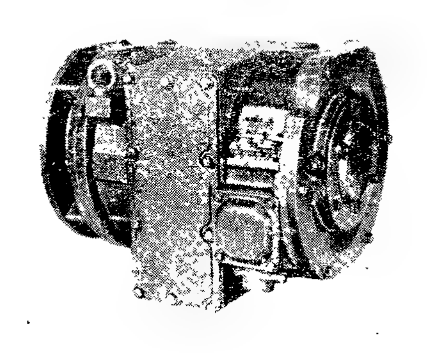


Рис. 1-8. Рольганговый электродвигатель с водяным охлаждением типа АРФВ 6-го габарита. Вид со стороны, противоположной приводу.

Габаритные и присоединительные размеры двигателей приведены в конце книги.

Станины и щиты. Станины, подшипниковые щиты и подшипниковые крышки, а также коробки выводов отливаются из чугуна.

Для улучшения охлаждения двигателей станины снаружи имеют кольцевые ребра; подшипниковые щиты имеют наружные и внутренние ребра. С целью уменьшения высоты двигателя ребра на верхних частях станин и щиты срезаны.

Наличие кольцевых ребер на станинах и ребер на щитах значительно увеличивает жесткость конструкции двигателей. Конструкция станин и щитов допускает возможность сборки двигателей как с правым, так и с левым расположением коробки выводов.

Обмотанный и пропитанный статор плотно запрессовывается в станину, что создает прочную посадку и способствует хорошему отводу тепла. Для гарантии от проворачивания и осевого перемещения сердечник статора дополнительно крепится стопорными цилиндрическими штифтами, после чего производится чистовая проточка замков.

Сердечники статоров. Листы сердечников статоров электродвигателей штампуются из электротехнической стали Э12 и Э13 (ГОСТ 802-58) толщиной 0,5 мм. Для уменьшения потерь в стали предусмотрена лакировка листов статоров кремнийорганическим лаком. Сердечник пакета статора набирается по весу и спрессовывается на оправке с применением пазовых клиньев для лучшей шихтовки. Спрессованный сердечник статора с помощью нажимных шайб скрепляется наружными скобами. Для большей надежности крепления и жесткости пакетов скобы привариваются к спинке сердечника статора. Для уменьшения распушевки сердечника предусмотрены крайние листы.

Роторы. Листы сердечников роторов изготавливаются из электротехнической стали. Для листов в основном используются внутренние высечки, образующиеся при штамповке листов статора.

В рольганговых двигателях серии АР не применяются узкие и глубокие пазы ротора, поэтому явление вытеснения тока в роторе при расчетах не учитывается. Применение узких и глубоких пазов могло бы вызвать механическое ослабление литой клетки ротора, что крайне

нежелательно, так как могло бы привести к быстрому разрушению клетки ротора. Применение роторов с вытеснением тока в рольганговых двигателях нецелесообразно еще и потому, что магнитное рассеяние в заторможенном двигателе сильно уменьшается, вследствие этого возрастают ток и потери в режиме короткого замыкания. Это противоречит требованию продолжительного нахождения двигателя в заторможенном состоянии под полным напряжением сети. Кроме того, при применении ротора с вытеснением тока уменьшается максимальный момент.

Для более рационального использования медной обмотки статора и сравнительно дорогих изоляционных материалов, а также для обеспечения стабильности показателей однотипных электродвигателей (меньший разброс показателей из-за осевого смещения статора и ротора относительно среднего положения), что особенно важно для рольганговых двигателей, работающих в основном группами, сердечник ротора делается на 3—5 мм длиннее сердечника статора. Поэтому имеются добавочные компаундные штампы для вырубки листов ротора из полосы.

При работе двигателя частота основного магнитного потока в роторе колеблется от 50 Гц до долей герца, в среднем составляя небольшую величину.

В рольганговых электродвигателях серии АР воздушные зазоры увеличены по сравнению с асинхронными электродвигателями общепромышленного исполнения. Добавочные потери составляют всего около 0,5% потребляемой мощности. В связи с этим листы роторов не лакируются. Для лучшей шихтовки пакетов сердечники роторов собираются на оправках с использованием пазовых клиньев.

При большом числе пусков и торможений для увеличения механической прочности места соединения короткозамыкающего кольца с клеткой у роторов 6—8-го габаритов крайние листы стали, прилегающие к кольцам, имеют увеличенные размеры пазов по сравнению со средними листами. С каждой стороны пакета ставится по 14 листов с увеличенными пазами. В роторах 4 и 5-го габаритов специальные крайние листы не ставятся. Коэффициент заполнения сердечника пакета сталью колеблется от 0,96 до 0,98, в среднем — 0,97. Роторы заливаются на машинах для литья под давлением.

Для заливки роторов применяется специально разработанный алюминиево-магниевый сплав с высокой механической прочностью и повышенной коррозионной стойкостью. Состав сплава: 7% магния, остальное чистый алюминий, причем контролем является удельное сопротивление, которое при 15—20°C находится в пределах 0,065—0,0704 мкОм·м, расчетное значение — 0,0667 мкОм·м.

Удельное сопротивление сплава связано с температурой известной зависимостью $\rho_t = \rho_0(1+\alpha t)$. Температурный коэффициент α в среднем равен 0,0023°C^{-1}.

Залитый пакет ротора плотно напрессовывается на вал до упорного буртика. Для устранения радиального перемещения ротор крепится на валу призматической шпонкой, а от осевого перемещения удерживается плотной посадкой.

Валы. Электродвигатели серии АР должны соединяться с приводом эластичной или зубчатой муфтой, но их можно применять для работы и с зубчатой передачей.

Расчет вала производится по фактическому максимальному моменту двигателя в холодном состоянии с учетом возможности работы электродвигателя на повышенном напряжении (до 10%). Для ограничения размеров валов и подшипников при расчете свободного конца вала двигателей на прочность начальный диаметр ведущей шестерни d_0 принимается равным 2,5d, где d — диаметр свободного конца вала.

Наименьший диаметр ведущей шестерни для двигателей исполнений АР и АРФ приведен в табл. 1-1.

При расчете вала имеется в виду, что начальный эксцентриситет, принимаемый обычно 0,1δ (воздушного зазора), при износе подшипников может значительно увеличиться. Поэтому расчетное значение эксцентриситета

Таблица 1-1

Наименьшие диаметры ведущей шестерни

Тип двигателя АР, АРФ	d, мм	d_0, мм
42, 43	32	80
52, 53	40	100
63, 64	50	125
73, 74	60	150
83, 84	75	175

принимается 0,3δ. В остальном расчет вала с учетом динамической нагрузки не отличается от общепринятых методов расчета.

Рабочие концы валов электродвигателей исполнения АР, АРФ имеют цилиндрическую форму.

Электродвигатели типа АРК с полым конусным валом предназначены для непосредственной насадки на консольную часть вала ролика или редуктора рольганга. Такая специфика применения определила и конструкцию полого вала. Расчет полых конусных валов значительно труднее, чем обычных. Прочность таких валов для динамических режимов работы двигателей подобно трубе проверяется дополнительно на крутильные колебания.

Валы электродвигателей серии АР изготавливаются из углеродистой конструкционной стали марки 35, двигателей АРК — из стали марки 45. По требованию заказчика для особо тяжелых режимов работы валы могут изготавливаться из стали марки 40Х.

Подшипники. Роликовые и шариковые подшипники, применяемые в серии АР, приведены в табл. 1-2.

Шарикоподшипники изготавливаются по ГОСТ 8338-57, роликоподшипники — по ГОСТ 8328-57.

Изоляция статоров. Пазовая изоляция статоров двигателей 4 и 5-го габаритов состоит из трех слоев: стекломиканит на связующих кремнийорганических лаках толщиной 0,25 мм, находящийся между двумя слоями кремнийорганической стеклолакоткани ЛСК толщиной 0,15 мм. Для усиления пазовой изоляции при выходе из паза коробочка изготовляется с «манжетой» (подворотом), внутренний слой стеклолакоткани длиннее пазовой

Таблица 1-2

Шариковые и роликовые подшипники

Тип двигателя	№ подшипника со стороны привода	№ подшипника с противоположной приводу стороны	Тип двигателя	№ подшипника со стороны привода	№ подшипника с противоположной приводу стороны
АР, АРФ 42, 43	2307	307	АР, АРФ 63, 64	2311	311
АРК 42, 43	214	310	АРК 63, 64	222	315
АР, АРФ 52, 53	2309	309	АР, АРФ 73, 74	2313	313
АРК 52, 53	219	312	АРК 73, 74	228	315
			АР 83, 84	2317	317

коробочки на 30—40 мм. Манжета огибает пазовую коробочку и входит в паз.

Пазовая изоляция статоров 6—8-го габаритов отличается от изоляции 4 и 5-го габаритов только толщиной материала (стекломиканит 0,4 мм).

Междуслойная изоляция в пазу и междуфазная изоляция в лобовых частях состоят из тех же материалов, что и пазовая изоляция. Междуслойную и междуфазную изоляцию рекомендуется предварительно склеивать кремнийорганическим лаком. Для статоров 4 и 5-го габаритов допускается изготовление прокладок только из стекломиканита толщиной 0,4 мм.

Изоляция междукатушечных соединений осуществляется трубками из стеклолакоткани. Допускается изолировка междукатушечных переходов стекломикалентой (или стеклослюдопластолентой) 0,15—0,2 мм в полперекроя с закреплением ее стеклонитью в начале и в конце наложения. Материалы для изоляции соединений применяются также класса Н.

Обмотка статора соединяется в звезду и на лобовой части закрепляется изолированный от корпуса «нуль», а на зажимы панели проводом марки РКГМ (изоляция класса Н) выводятся три проводника — начала фаз.

Обмотанные статоры после предварительной сушки (3 ч при температуре 120°С) двукратно пропитываются в кремнийорганическом лаке. После пропитки и сушки для увеличения влагостойкости лобовые части статоров покрываются 1—2 раза кремнийорганической эмалью.

Изоляционные панели изготавливаются из нагревостойких пластмасс с неорганическими наполнителями.

Схемы соединений. Особенностью схем соединений двигателей является то, что наматывается целиком вся фаза обмотки статора вместе с междукатушечными соединениями. На междукатушечные соединения надеваются изоляционные стеклолакотрубки. Таким образом, после укладки обмотки в пазы не требуется пайка или сварка соединений, что повышает надежность электродвигателей. Намотка всей фазы сразу с междукатушечными соединениями определяет и специфический порядок укладки фаз, который несколько отличается от общепринятого.

В так называемых классических схемах обмотки начала фаз находятся строго под электрическим углом 120°. Но в этом случае укладка двухслойной обмотки

Таблица 1-3

Схемы обмоток статоров двигателей серии АР

Тип двигателя	2p	Z_1	q	Шаг y	Число параллельных ветвей	Порядок укладки секций по фазам при дробном q (обмотка двухслойная)
42, 43	4	36	3	7	1	Обмотка двухслойная
42, 43	6	36	2	5	1	Обмотка двухслойная
42, 43	8	36	3/2	4	1	1Ф 1 2 1 2 1 2 1 2 3Ф 2 1 2 1 2 1 2 1 2Ф 1 2 1 2 1 2 1 2
42, 43	10	36	6/5	3	1	1Ф 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 3Ф 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2Ф 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2
42	12	36	1	3	1	Обмотка двухслойная
43	12	36	1	3	1	Обмотка однослойная
52, 53	6	45	5, 2	5	1	1Ф 23 23 23 3Ф 32 32 32 2Ф 23 23 23
52, 53 63, 64	8	45	15/8	5	1	1Ф 2 2 2 2 2 2 2 1 3Ф 2 2 2 2 1 2 2 2 2Ф 2 1 2 2 2 2 2 2
52, 53 63, 64	10	45	3/2	4	1	1Ф 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 3Ф 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 2Ф 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
52, 53 63, 64	12	45	5/4	3	1	1Ф 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 3Ф 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2Ф 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1
63, 64	16	45	15/16	3	1	1Ф 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 3Ф 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2Ф 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1

Тип двигателя	2p	Z_1	q	Шаг y	Число параллельных ветвей	Порядок укладки секций по фазам при дробном q (обмотка двухслойная)
73, 74	10	54	9/5	5	1	1Ф 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2 3Ф 2 1 2 2 2 2 1 2 2 2 2Ф 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1
73	12	54	3/2	4	2	1Ф 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 3Ф 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2Ф 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2
74	12	54	3/2	4	1	1Ф 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 3Ф 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2Ф 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2
73, 74	16	54	9/8	3	1	1Ф 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 3Ф 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 2Ф 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2
83, 84	10	72	12/5	7	2	1Ф 3 2 2 2 3 3 2 2 2 3 3Ф 3 3 2 2 2 3 3 2 2 2 2Ф 2 2 3 3 2 2 2 3 3 2
83, 84	12	72	2	5	2	Обмотка двухслойная
83, 84	16	72	3/2	4	2	1Ф 12 12 12 12 12 12 12 12 3Ф 21 21 21 21 21 21 21 21 2Ф 12 12 12 12 12 12 12 12
83	20	72	6/5	3	1	1Ф 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 3Ф 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2Ф 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2
84	20	72	6/5	3	1	1Ф 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 3Ф 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2Ф 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2

Таблица 1-4

Размеры секций, мм (см. рис. 1-9)

Тип двигателя АР	А	Б	В	Г	R_1	R_2
42-4	160	132	74	9	15	5
43-4	200	172	74	9	15	5
42-6	151	135	54	9	15	5
43-6	191	175	54	9	15	5
42-8	151	135	42	9	12	5
43-8	191	175	42	9	12	5
42-10	135	135	31	9	15,5	—
43-10	175	175	31	9	15,5	—
42-12	135	135	31	9	15,5	—
43-12	190	190	31	9	15,5	—
52-6	184	160	63	12	18	7
53-6	244	220	63	12	18	7
52-8	184	160	63	12	18	7
53-8	244	220	63	12	18	7
52-10	184	160	50	12	18	7
53-10	244	220	50	12	18	7
52-12	174	174	37	12	18	—
53-12	234	234	37	12	18	—
63-8	195	169	68	10	23	5
64-8	240	214	68	10	23	5
63-10	195	169	68	10	23	5
64-10	240	214	68	10	23	5
63-12	193	169	48	10	16	5
64-12	238	214	48	10	16	5
63-16	193	169	48	10	16	5
64-16	238	214	48	10	16	5
73-10	225	225	90	10	34	—
74-10	290	290	90	10	34	—
73-12	241	241	70	10	23	—
74-12	306	306	70	10	23	—
73-16	251	251	51	10	18	—
74-16	316	316	51	10	18	—
83-10	325	315	103	12	35	6
84-10	415	405	103	12	35	6
83-12	320	310	71	12	24	6
84-12	410	400	71	12	24	6
83-16	315	305	55	12	18	6
84-16	405	395	55	12	18	6
83-20	305	300	40	12	13	6
84-20	395	390	40	12	13	6

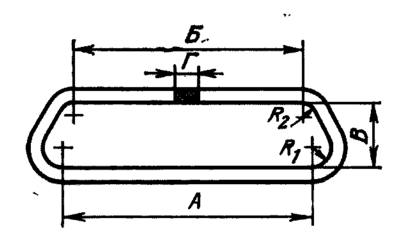


Рис. 1-9. Эскиз секции статора.

может производиться только отдельными катушечными группами с последующим дополнительным соединением их в фазы. При укладке двухслойной обмотки статоров рольганговых электродвигателей (как и асинхронных электродвигателей общего назначения небольшой мощности) принят следующий порядок укладки:

1) укладывается первая катушечная группа первой фазы;

2) укладывается первая катушечная группа третьей фазы;

3) укладывается первая катушечная группа второй фазы;

4) переворачивается вторая катушка первой фазы и укладывается в пазы;

5) таким же образом переворачиваются и укладываются катушечные группы третьей и второй фаз;

6) третьи катушки фаз укладываются без переворачивания и т. д.

Следует обратить внимание на одну особенность укладки обмотки с дробным q меньше единицы.

Отсутствующая секция (в табл. 1-3 она обозначена 0) при укладке обмотки учитывается как существующая в действительности: если секция, следующая за отсутствующей, нечетная (с учетом нулевой), то она не переворачивается, а если она четная, то переворачивается. Если не учесть эту особенность, то все секции, следующие за нулевой, будут «вывернуты», т. е. соединены неправильно.

Разрешается укладка обеих сторон первых секций на дно паза, а последних секций в верхнюю часть паза, если лобовая часть обмотки по толщине не выходит за допустимые пределы.

Для укладки обмотки используются временные проходные прокладки из электрокартона или кабельной бумаги толщиной 0,1—0,2 мм. При такой укладке обмотки начала и концы фаз чередуются.

Укладка обмотки с отклонением от классической приводит к некоторому отклонению вращающегося магнит-

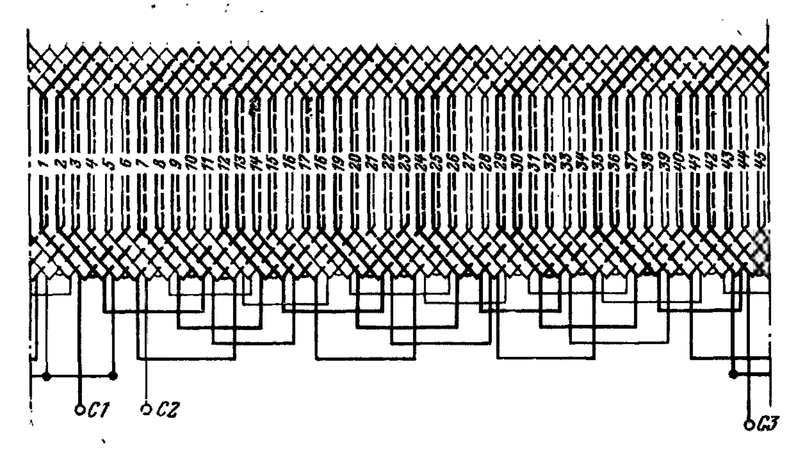


Рис. 1-10. Схема обмотки статора двигателей АР 52-8 и АР 53-8.

ного поля от кругового, но оно невелико и в данном случае им пренебрегают.

В табл. 1-3 приведены схемы соединения обмоток статоров двигателей.

В табл. 1-4 и на рис. 1-9 приведены размеры секций, необходимые для изготовления шаблонов. На рис. 1-10 приведена развернутая схема обмотки статоров двигателей АР 52-8 и АР 53-8.

1-3. КАТАЛОЖНЫЕ И ОБМОТОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Серия электродвигателей АР предназначена как для повторно-кратковременного, так и для продолжительного режимов работы с определенной мощностью, хотя для этих целей можно было иметь две модификации серии:

а) для повторно-кратковременного режима работы;

б) для продолжительного режима работы.

Однако это не было сделано по следующим соображениям:

1) на транспортных рольгангах, наряду с продолжительным режимом работы, встречается также и повторно-кратковременный, что стирает резкую грань между двумя крайними режимами;

2) для продолжительного режима работы обычно требуются небольшие мощности;

3) повышенные требования к надежности и долговечности, а также к жесткости конструкции относятся ко всем режимам работы;

4) при двух модификациях увеличивается парк резервных двигателей на металлургических заводах;

5) наличие двух модификаций затрудняет производство и ремонт двигателей.

Применение кремнийорганических материалов для изоляции обмоток статоров двигателей позволило совместить эти две модификации в одной, предназначенной как для повторно-кратковременного (рабочие рольганги), так и для продолжительного (транспортные рольганги) режимов работы, хотя конструкция и электромагнитные характеристики двигателей выбраны, главным образом, из условия, что основным режимом работы является повторно-кратковременный режим с большим числом включений в час. Применение одной кремнийорганической изоляции объясняется также соображениями повышенной надежности двигателей и ограничением сортамента изоляционных материалов, необходимых для производства и ремонта двигателей.

Определяющим фактором при выборе электродвигателей для привода рабочих рольгангов прокатных станов является работа, выполняемая ими при ускорении и торможении. Дополнительные маховые массы, разгоняемые двигателем во время пусков, часто бывают во много раз больше маховых масс ротора электродвигателя. Кроме того, вращающий момент электродвигателя должен быть таким, чтобы при внезапном приложении нагрузки двигатель не «опрокидывался», а мог снижать частоту вращения. Расчет продолжительности пуска основывается на уравнении движения вращающегося тела

$$M=\Sigma J\frac{d\omega}{dt}, \qquad (1\text{-}1)$$

где $\omega=2\pi n/60$ — угловая скорость; ΣJ — суммарный момент инерции, кг·м²; n — частота вращения.

Продолжительность разгона $t_п$, с, определится по формуле

$$t_п=\frac{2\pi\Sigma J}{60}\int\limits_0^n\frac{dn}{M}=\frac{\Sigma J}{9,55}\int\limits_0^n\frac{dn}{M}. \qquad (1\text{-}2)$$

Если считать вращающий момент в процессе пуска постоянным и равным среднему значению, то продолжительность пуска будет:

$$t_п=\frac{4gn\Sigma J}{375M}=\frac{n\Sigma J}{9,55M}. \qquad (1\text{-}3)$$

Электрические потери при пуске, торможении и реверсировании в обмотках статора можно приближенно рассчитать через электрические потери в роторе, пренебрегая намагничивающим током:

$$P_{м1}=P_{м2}r_1/r''_2,$$

где $r''_2=\sigma^2 r'_2$; r'_2 — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора; σ_1 — модуль комплексного сопротивления, используемого при преобразовании Т-образной схемы замещения в Г-образную[1].

Потери $P_{м1}$ можно уменьшить, взяв повышенное сопротивление обмотки ротора. Однако, учитывая связанное с этим изменение продолжительности разгона, увеличивать сопротивление обмотки ротора можно лишь до некоторого предела, обусловленного критическим скольжением s_m. Скольжение s_m, необходимое для разгона электродвигателя за кратчайшее время t от скольжения s_1 до скольжения s_2, и время t определяются по формулам [Л. 17]:

$$s_m=\sqrt{\frac{s^2_1-s^2_2}{\ln\left(\frac{s_1}{s_2}\right)^2}}; \qquad (1\text{-}4)$$

$$t=\frac{T_m}{2}\sqrt{(s^2_1-s^2_2)\ln\left(\frac{s_1}{s_2}\right)^2}. \qquad (1\text{-}5)$$

Константа T_m представляет собой время, с, которое потребовалось бы при пуске, т. е. при разгоне от $s_1=1$ до $s_2=0$, если бы во время пуска средний пусковой момент был равен максимальному.

Но так как при пуске электродвигателя синхронная частота вращения n_c теоретически достигается лишь при времени, равном бесконечности, то для упрощения расчетов продолжительности разгона принимают конечную частоту вращения, несколько меньшую n_c. Для расчета рольганговых электродвигателей обычно рассматривается разгон от нуля до 90% n_c, что соответствует изменению скольжения от $s_1=1{,}0$ до $s_2=0{,}1$. В случае торможения электродвигателя противовключением от 90% n_c до полной остановки скольжение изменяется от $s_1=1{,}9$ до

---

[1] В литературе этот коэффициент обозначается также $C_1=\frac{Z_0+Z_1}{Z_0}=c_1e^{j\gamma}$. См., например, Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 2. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963.

$s_2=1$; при торможении противотоком с немедленным последующим реверсом от 90% положительной синхронной частоты вращения до 90% отрицательной скольжение изменяется от $s_1=1{,}9$ до $s_2=0{,}1$.

Если подставить эти значения в равенства для s_m и t, то при торможении электродвигателя противовключением за кратчайшее время величина s_m получится значительно больше, чем рассчитанная для пуска. Однако для такого увеличения s_m необходимо увеличивать сопротивление ротора, что влечет за собой удлинение продолжительности разгона. Поэтому для достижения минимальной продолжительности реверсирования сопротивление обмотки ротора принимается с таким расчетом, чтобы значения s_m получались промежуточными между двумя наиболее благоприятными его значениями для пуска и торможения. В этом случае представляется возможным получить для большинства случаев и необходимые мощности для транспортировки прокатываемых изделий. Если бы s_m было принято равным единице или больше, то электродвигатели, особенно многополюсные ($2p>8$), могли бы перегреваться в длительном режиме работы даже при холостом ходе. Тогда необходимо было бы иметь две модификации двигателей: для рабочих рольгангов и для транспортных рольгангов.

На рис. 1-11 приведена типичная механическая характеристика рольгангового электродвигателя при пуске и торможении противотоком.

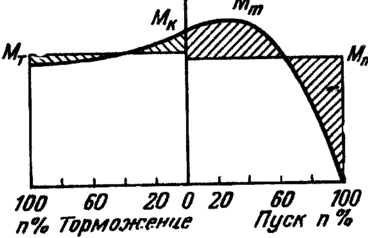


Рис. 1-11. Характеристика вращающего момента рольгангового электродвигателя при пуске (частота 50 Гц) и торможении противотоком.

$M_к$ — начальный пусковой момент; M_m — максимальный (опрокидывающий) момент; $M_п$ — средний момент за время пуска; $M_т$ — средний момент за время торможения противотоком.

Таким образом, важнейшими особенностями асинхронных рольганговых двигателей являются высокие пусковые моменты и мягкая механическая характеристика вращающего момента; мощность при транспортировании относительно мала. Мягкая механическая характеристика обеспечивает плавное изменение скорости при пусках, реверсах и торможениях, так как при резких и нерав-

номерных ускорениях может происходить буксование роликов относительно раскатываемого или транспортируемого металла, что может привести к снижению производительности прокатного оборудования. Потери, выделяющиеся в двигателе во время пуска, зависят от времени его разгона, которое в свою очередь зависит как от начального пускового момента двигателя, так и от соотношения между максимальным и пусковым моментами.

Для рольганговых двигателей, предназначенных для нормальных реверсов и работающих в диапазоне скольжений 0—2, номинальным моментом для которых является начальный пусковой момент, наилучшие динамические характеристики при частоте 50 Гц получаются, если критическое скольжение $s_m=0,7\div1$. При этом получается наиболее выгодное отношение максимального и пускового моментов $M_m=(1\div1,1)M_к$, обеспечивающее минимальное время реверсов, наименьшие потери и максимум динамической постоянной двигателей серии АР. Характеристика вращающего момента электродвигателя получается при этом такой, что двигатель не останавливается, а снижает частоту вращения при внезапном приложении нагрузки.

Приведенное выше соотношение максимального и начального пускового моментов относится к нагретому состоянию двигателей. Для получения указанного соотношения $M_m/M_к$ у рольганговых электродвигателей увеличено по сравнению с обычными двигателями критическое скольжение, определяемое формулой

$$s_m=\frac{r''_2}{\sqrt{r_1'^2+x_к''^2}}, \qquad (1\text{-}6)$$

где $x''_к=x'_1+x''_2$; $r'_1=\sigma r_1$; $x'_1=\sigma x_1$; $r''_2=\sigma^2 r'_2$; $x''_2=\sigma^2 x_2$ — активное и индуктивное сопротивления обмоток статора и ротора.

Для этого r''_2 увеличивается в 5—6 раз по сравнению с сопротивлением у нормальных двигателей, уменьшаются в 2—2,5 раза сечения стержней роторной клетки и заливают ее алюминиево-магниевым сплавом с электрической проводимостью в 2,1 раза пониженной по сравнению с чистым алюминием. Активное сопротивление короткозамкнутых колец составляет в среднем 5% сопротивления стержней (от 2 до 7%). Выбор такого соотношения сопротивлений короткозамыкающих колец и

Таблица 1·5

Каталожные данные рольганговых двигателей серии АР
U=380 В, f=50 Гц, соединение звездой

Тип электродвигателя АР, АРФ, АРК	При пуске			В длительном режиме работы, ПВ=100%					Динамическая постоянная Д при ПВ %			
	Пусковой момент $M_К$	Пусковой ток $I_{К1}$	Потери при к. з. $P_К$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cosφ	15	25	40	100
	Н·м/(кгс·м)	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
42-4	13,7/1,4	9	4,5	1,1	2,9	1290	75	0,77	135	133	129	115
43-4	23,5/2,4	15	6,5	1,5	3,8	1290	77	0,78	160	158	153	138
42-6	13,7/1,4	8	3,6	0,9	3,3	870	70	0,60	270	265	256	220
43-6	23,5/2,4	12	5,0	1,2	3,8	870	74	0,64	323	315	305	263
42-8	13,7/1,4	7	3,5	0,7	2,8	640	64	0,60	413	400	383	310
43-8	23,5/2,4	10	4,5	0,9	3,4	640	66	0,61	508	495	475	400
42-10	13,7/1,4	6	3,0	0,5	2,8	520	55	0,50	580	555	518	370
43-10	23,5/2,4	8	3,6	0,65	3,5	520	57	0,50	715	688	645	475
42-12	13,7/1,4	5	2,5	0,3	3,4	430	37	0,36	743	700	635	373
43-12	23,5/2,4	7	2,8	0,4	4,0	430	42	0,36	925	875	800	493
52-6	44,1/4,5	18	8,0	2,0	5,4	870	75	0,75	530	525	518	465
53-6	68,6/7,0	27	13,0	2,8	7,6	870	75	0,75	635	625	612	550
52-8	44,1/4,5	15	7,0	1,6	4,8	640	70	0,73	883	870	850	770
53-8	68,6/7,0	23	10,0	2,2	6,6	640	76	0,67	1040	1025	1000	890
52-10	44,1/4,5	13	6,0	1,3	5,0	520	66	0,60	1285	1250	1200	997
53-10	68,6/7,0	21	9,0	1,8	6,9	520	68	0,58	1540	1500	1440	1210
52-12	44,1/4,5	11	5,0	1,0	4,9	430	62	0,50	1655	1595	1510	1165
53-12	68,6/7,0	20	8,0	1,4	7,6	430	65	0,43	1960	1890	1780	1260
63-8	98,1/10	28	16,0	2,9	7,6	660	76	0,76	1360	1340	1305	1150

Продолжение табл. 1-5

Тип электродвигателя АР, АРФ, АРК	При пуске			В длительном режиме работы, ПВ=100%					Динамическая постоянная $Д$ при ПВ %			
	Пусковой момент $M_к$	Пусковой ток $I_{к1}$	Потери при к. з. $P_к$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cosφ	15	25	40	100
	Н·м/(кгс·м)	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
64-8	137/14	36	20,0	3,5	9,4	660	75	0,75	1610	1590	1555	1350
63-10	98,1/10	25	11,0	2,3	7,6	530	72	0,64	2005	1955	1880	1590
64-10	137/14	33	15,0	2,8	9,3	530	74	0,62	2395	2340	2260	1930
63-12	98,1/10	23	9,0	1,9	7,8	435	69	0,54	2650	2575	2470	2050
64-12	137/14	31	13,0	2,3	10,0	435	70	0,49	3170	3080	2930	2350
63-16	98,1/10	22	8	1,4	11	325	54	0,35	4080	3830	3440	1880
64-16	137/14	28	11	1,7	14	325	55	0,34	4980	4650	4150	2090
73-10	196/20	50	23	5,0	13,3	530	76	0,75	2870	2810	2730	2390
74-10	274/28	70	32	6,4	17	530	77	0,75	3270	3200	3100	2680
73-12	196/20	42	20	4,1	14	450	75	0,59	3930	3830	3700	3120
74-12	274/28	63	30	5,3	17,6	450	76	0,60	4530	4400	4220	3480
73-16	196/20	37	16	3,0	15	330	67	0,45	6250	6000	5600	4050
74-16	274/28	58	25	4,0	19,3	330	70	0,45	7280	7000	6580	4930
83-10	392/40	90	47	8,0	18	540	85	0,79	3680	3630	3530	3130
84-10	539/55	120	54	10	22	540	85	0,81	4330	4250	4140	3700
83-12	392/40	70	37	6,7	17	450	83	0,72	5130	5030	4880	4280
84-12	539/55	100	48	8,3	21	450	84	0,72	5980	5880	5700	4990
83-16	392/40	58	25	5,0	19	335	77	0,52	8550	8280	7880	6260
84-16	539/55	86	33	6,4	24	335	78	0,52	9930	9600	9100	7100
83-20	392/40	50	24	4,0	21	265	70	0,41	12 400	11 900	11 200	8450
84-20	539/55	76	31	5,0	27	265	70	0,41	14 130	13 630	12 850	9800

Таблица 1-6

Каталожные данные рольганговых двигателей серии АР 60 Гц, соединение фаз звездой

Тип электродвигателя	При пуске				В продолжительном режиме работы (ПВ=100%)					Динамическая постоянная $Д$ при ПВ %			
	Пусковой момент $M_К$	Напряжение	Пусковой ток $I_{К1}$	Потери при к. з. $P_К$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cos φ	15	25	40	100
АР, АРФ, АРК	Н·м/(кгс·м)	В	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
42-4	13,7/1,4	380/440	10,4/9	4,5	1,1	2,9/2,5	1550	75	0,77	89	87	82	76
43-4	23,5/2,4	380/440	17/15	6,5	1,5	3,8/3,3	1550	77	0,78	106	103	100	91
42-6	13,7/1,4	380/440	9,2/8	3,6	0,9	3,3/2,8	1040	70	0,60	178	173	169	144
43-6	23,5/2,4	380/440	14/12	5,0	1,2	3,8/3,3	1040	74	0,64	213	207	201	173
42-8	13,7/1,4	380/440	8/7	3,5	0,7	2,8/2,4	770	64	0,60	270	263	252	205
43-8	23,5/2,4	380/440	11,5/10	4,5	0,9	3,4/2,9	770	66	0,61	335	325	313	263
42-10	13,7/1,4	380/440	7/6	3,0	0,5	2,8/2,4	625	55	0,50	380	365	340	241

Продолжение табл. 1-6

Тип электродвигателя	При пуске				В продолжительном режиме работы (ПВ=100%)					Динамическая постоянная $Д$ при ПВ %			
	Пусковой момент $M_к$	Напряжение	Пусковой ток $I_{к1}$	Потери при к. з. $P_к$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cosφ	15	25	40	100
АР, АРФ, АРК	Н·м/(кгс·м)	В	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
43-10	23,5/2,4	380/440	9,2/8	3,6	0,65	3,5/3	625	57	0,50	467	450	425	313
42-12	13,7/1,4	380/440	5,8/5	2,5	0,3	3,4/3	515	37	0,36	490	462	417	250
43-12	23,5/2,4	380/440	8/7	2,8	0,4	4/3,5	515	42	0,36	607	575	520	323
52-6	44,1/4,5	380/440	21/18	8	2,0	5,4/4,7	1040	75	0,75	353	350	343	307
53-6	68,6/7,0	380/440	31/27	13	2,8	7,6/6,5	1040	75	0,75	420	412	405	365
52-8	44,1/4,5	380/440	17/15	7	1,6	4,8/4,1	770	70	0,73	583	573	560	508
53-8	68,6/7,0	380/440	26/23	10	2,2	6,6/5,7	770	76	0,67	690	675	658	587

Продолжение табл. 1-6

Тип электродвигателя	При пуске				В продолжительном режиме работы (ПВ=100%)					Динамическая постоянная *Д* при ПВ %			
	Пусковой момент $M_К$	Напряжение	Пусковой ток $I_{К1}$	Потери при к. з. $P_К$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cosφ	15	25	40	100
АР, АРФ, АРК	Н·м/(кгс·м)	В	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
52-10	44,1/4,5	380/440	15/13	6	1,3	5,0/4,3	625	66	0,60	848	825	790	660
53-10	68,6 7,0	380/440	24/21	9	1,8	6,9/6,0	625	68	0,58	1015	1000	953	800
52-12	44,1/4,5	380/440	12,7/11	5	1,0	4,9/4,2	515	62	0,50	1075	1050	1000	775
✓ 53-12	68,6/7,0	380/440	23/20	8	1,4	7,6/6,6	515	65	0,43	1300	1250	1175	825
63-8	98,1/10	380/440	32/28	16	2,9	7,6/6,6	790	76	0,76	905	875	862	750
64-8	137/14	380/440	42/36	20	3,5	9,4/8,2	790	75	0,75	1060	1040	1025	890
63-10	98,1/10	380/440	29/25	11	2,3	7,6/6,6	635	72	0,64	1325	1290	1240	1040

Продолжение табл. 1-6

Тип электродвигателя	При пуске				В продолжительном режиме работы (ПВ=100%)					Динамическая постоянная *Д* при ПВ %			
	Пусковой момент $M_к$	Напряжение	Пусковой ток $I_{к1}$	Потери при к. з. $P_к$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cos φ	15	25	40	100
АР, АРФ, АРК	Н·м/(кгс·м)	В	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
64-10	137/14	380/440	38/33	15	2,8	9,3/8,0	635	74	0,62	1575	1550	1500	1270
63-12	98,1/10	380/440	26,6/23	9	1,9	7,8/6,7	520	69	0,54	1740	1700	1625	1350
64-12	137/14	380/440	36/31	13	2,3	10,0/8,8	520	70	0,49	2100	2040	1925	1550
63-12	98,1/10	380/440	25/22	8	1,4	11,0/9,8	390	54	0,35	2700	2530	2275	1250
64-16	137/14	380/440	32/28	11	1,7	14,0/12,0	390	55	0,34	3300	3080	2750	1400
73-10	196/20	380/440	64/55	23	5,0	13,3/11,5	635	76	0,75	1900	1860	1800	1575
74-10	274/28	380/440	81/70	32	6,4	17,0/14,6	635	77	0,75	2150	2110	2050	1775

Продолжение табл. 1-6

Тип электродвигателя	При пуске				В продолжительном режиме работы (ПВ=100%)					Динамическая постоянная $Д$ при ПВ %			
	Пусковой момент $M_к$	Напряжение	Пусковой ток $I_{к1}$	Потери при к. з. $P_к$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cos φ	15	25	40	100
АР, АРФ, АРК	Н·м/(кгс·м)	В	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
73-12	196/20	380/440	49/42	20	4,1	14,0/12,0	540	75	0,59	2580	2530	2450	2080
74-12	274/28	380/440	73/63	30	5,3	17,6/15,0	540	76	0,60	3000	2900	2800	2300
73-16	196/20	380/440	43/37	16	3,0	15/13	395	67	0,45	4080	3950	3700	2680
74-16	274/28	380/440	67/58	25	4,0	19,3/16,7	395	70	0,45	4800	4630	4330	3250
83-10	392/40	380/440	104/90	47	8,0	18/15,6	650	85	0,79	2440	2400	2310	2075
84-10	539/55	380/440	139/120	54	10	22/19	650	85	0,81	2850	2780	2730	2440

Продолжение табл. 1-6

Тип электродвигателя	При пуске				В продолжительном режиме работы (ПВ=100%)					Динамическая постоянная $Д$ при ПВ %			
	Пусковой момент $M_к$	Напряжение	Пусковой ток $I_{к1}$	Потери при к. з. $P_к$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cos φ	15	25	40	100
АР, АРФ, АРК	Н·м/(кгс·м)	В	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹			
83-12	392/40	380/440	81/70	37	6,7	17/15	540	83	0,72	3380	3300	3200	2830
84-12	539/55	380/440	115/100	54	8,3	21/18	540	84	0,72	3950	3880	3750	3300
83-16	392/40	380/440	67/58	25	5,0	19/16	400	77	0,52	5630	5450	5200	4130
84-16	539/55	380/440	100/86	33	6,4	24/21	400	78	0,52	6550	6330	6000	4680
83-20	392/40	380/440	58/50	24	4,0	21/18	320	70	0,41	8230	7900	7450	5600
84-20	539/55	380/440	88/76	31	5,0	27/23	320	70	0,41	9380	9000	8500	6500

Таблица 1-7

Обмоточные данные двигателей серии АР
Обмоточный провод марки ПСДК

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	380 В, 50 Гц				220 В, 20 Гц			
	$s_п$	$d_{гол}$, мм	r_1 15°C, Ом	Масса изолированной меди на двигатель, кг	$s_п$	$d_{гол}$, мм	r_1 15°C, Ом	Масса изолированной меди на двигатель, кг
42-4	29×2	0,93	4,35	3,43	32×2	0,83	6,03	3,07
43-4	21×2	1,08	2,71	3,88	23×2	1,04	3,21	3,96
42-6	32×2	0,86	5,10	2,97	41×2	0,72	9,33	2,74
43-6	24×2	1,04	3,09	3,80	29×2	0,90	4,99	3,47
42-8	40×2	0,74	8,03	2,62	48×2	0,64	12,88	2,41
43-8	32×2	0,86	5,68	3,31	36×2	0,80	7,39	3,26
42-10	46×2	0,69	9,85	2,45	—	—	—	—
43-10	35×2	0,80	6,74	2,97	—	—	—	—
42-12	49×2	0,64	12,2	2,30	—	—	—	—
43-12*	74	0,83	7,06	3,58	—	—	—	—
52-6	22×2	1,30	2,33	6,85	24×2	1,25	2,88	7,30
53-6	15×2	1,62	1,26	8,75	18×2	1,50	1,81	9,40
52-8	24×2	1,25	2,75	6,95	27×2	1,16	3,59	6,80
53-8	16×2	1,62	1,34	9,30	20×2	1,40	2,24	8,80
52-10	24×2	1,25	2,61	6,56	29×2	1,12	3,92	6,50
53-10	17×2	1,56	1,47	8,80	21×2	1,35	2,42	8,30
52-12	27×2	1,16	3,18	5,96	33×2	1,04	4,84	6,00
53-12	18×2	1,45	1,71	7,64	23×2	1,25	2,92	7,40
63-8	17×2	1,74	1,14	10,45	19×2	1,56	1,75	10,45
64-8	13дв×2	1,35	0,833	11,3	14дв×2	1,25	1,14	11,45
63-10	17×2	1,68	1,22	9,80	21×2	1,45	2,03	9,10

Тип двигателя, АР, АРФ, АРК	360 В, 50 Гц				220 В, 20 Гц			
	$s_п$*	$d_{гол}$, мм	r_1 15°С, Ом	Масса изолированной меди на двигатель, кг	$s_п$	$d_{гол}$, мм	r_1 15°С, Ом	Масса изолированной меди на двигатель, кг
64-10	13дв×2	1,35	0,833	11,3	17×2	1,68	1,40	11,23
63-12	19×2	1,56	1,41	8,50	24×2	1,40	2,21	8,65
64-12	14дв×2	1,25	0,944	9,50	18×2	1,62	1,45	10,02
63-16	20×2	1,56	1,49	8,90	26×2	1,35	2,58	8,75
64-16	15дв+16дв	1,20	1,14	9,70	20×2	1,56	1,74	10,37
73-10	10дв×2	1,68	0,512	16,4	13дв×2	1,40	0,96	15,00
74-10	7тр+8тр	1,50	0,377	17,5	10дв×2	1,62	0,65	18,00
73-12	21×2	1,50	0,637	13,3	14дв×2	1,35	1,05	14,25
74-12	8дв×2	1,74	0,430	15,8	11дв×2	1,56	0,74	17,60
73-16	12дв×2	1,45	0,751	13,6	16дв×2	1,25	1,35	13,65
74-16	9дв×2	1,74	0,472	17,3	12дв×2	1,50	0,84	17,32
83-10	11дв×2	1,50	0,311	25,7	—	—	—	—
84-10	8дв+9дв	1,68	0,227	29,0	—	—	—	—
83-12	12дв×2	1,35	0,372	20,4	—	—	—	—
84-12	10дв×2	1,56	0,282	27,2	—	—	—	—
83-16	15дв×2	1,25	0,519	21,1	—	—	—	—
84-16	11ди×2	1,50	0,321	26,7	—	—	—	—
83-20	8тр×2	1,40	0,550	19,3	—	—	—	—
84-20	12дв×2	1,40	0,380	24,2	—	—	—	—

Примечание. $s_п$ — число проводников в пазу; $d_{гол}$ — диаметр голого провода; дв. тр. — двойной, тройной проводник.

* Обмотка однослойная.

стержней сделан из условия, чтобы небольшие технологические отклонения от заданной формы колец (например, износ пресс-форм для заливки роторов), а также некоторая неплотность металла в кольцах не оказывали заметного влияния на стабильность характеристик двигателей. В нормальных асинхронных двигателях r'_1 значительно меньше $x''_к$ и составляет 10—12%, а в рольганговых двигателях r'_1 составляет 20—30% (в среднем 27%) от $x''_к$.

Пренебрегая в выражении (1-6) сопротивлением r'_1, получаем:

$$s_m \approx \frac{r''_2}{x''_к} = \frac{r''_2}{2\pi f\left(\frac{L_1}{\sigma_1} + L'_2\right)}, \qquad (1\text{-}7)$$

где L_1 и L'_2 — индуктивности соответственно статора и ротора.

Видно, что s_m изменяется обратно пропорционально частоте питающей сети.

В табл. 1-5 приведены основные каталожные данные электродвигателей серии АР основного исполнения для 380 В и 50 Гц, а в табл. 1-6 — каталожные данные для 60 Гц.

В табл. 1-7 приведены обмоточные данные двигателей для 380 В, 50 Гц и 220 В, 20Гц.

Ввиду того, что в практических расчетах в настоящее время используются наряду с системой СИ и другие единицы измерения, моменты вращения в таблицах даны как в Н·м, так и в кгс·м, а динамические постоянные — в кг·м²·ч⁻¹.

1-4. РАБОТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЕ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

При питании от сети устойчивой постоянной частотой асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором общепромышленного применения, имеющие жесткую механическую характеристику, могут работать только в весьма узких диапазонах частот вращения. Если же питание осуществляется напряжением с изменяющейся частотой, то частотой вращения асинхронных двигателей можно управлять как и у двигателей постоянного тока. Напряжение переменной частоты можно получить,

например, от машинного или статического преобразователя частоты. Наиболее перспективным в настоящее время считается питание от статических преобразователей частоты.

При управлении частотой вращения асинхронных короткозамкнутых двигателей посредством изменения частоты и напряжения на зажимах обычно рекомендуется сохранять между ними известное соотношение:

$$\frac{U}{U_{н}}=\frac{f}{f_{н}}\sqrt{\frac{M}{M_{н}}}, \quad (1\text{-}8)$$

где индекс «н» относится к номинальной частоте, величины без индекса — к текущей частоте.

При таком соотношении частоты и напряжения обеспечивается постоянство магнитного потока двигателя $\Phi = U/f$. Однако формула (1-8) не является оптимальной.

Как известно, начальный пусковой момент асинхронного электродвигателя $M_{к}$ определяется по следующей формуле:

$$M_{к}=\frac{pm_1U^2{}_1r''{}_2}{2\pi f_1\left[(r'_1+r''_2)^2+(x'_1+x''_2)^2\right]}=\frac{pm_1U^2{}_1r''{}_2}{2\pi f_1\left(r''^2_{к}+x''^2_{к}\right)}, \quad (1\text{-}9)$$

где p — число пар полюсов; m_1 — число фаз.

С понижением напряжения и частоты на зажимах двигателя все больше проявляется падение напряжения на активных сопротивлениях, в результате чего уменьшается вращающий момент двигателя. Анализ механических характеристик показывает, что пусковые и максимальные вращающие моменты в двигательном режиме [см. формулы (1-9) и (1-11)] при уменьшении частоты значительно снижаются. При пропорциональном уменьшении напряжения и частоты на зажимах асинхронного двигателя его вращающий момент при малой частоте становится значительно меньше, чем при номинальной частоте 50 Гц. Для компенсации падения напряжения на активном сопротивлении статора напряжение на зажимах при снижении частоты следует уменьшать в меньшей мере, чем частоту. Это необходимо для сохранения магнитного потока в воздушном зазоре двигателя.

При пропорциональном уменьшении частоты и напряжения уменьшаются токи короткого замыкания статора и

ротора. Это изменение токов снижает потери двигателя в повторно-кратковременных режимах работы. Кроме того, при снижении частоты сети у двигателя появляется дополнительный запас по нагреву из-за уменьшения потерь в стали статора. Механические потери также уменьшаются. Для использования этого теплового запаса напряжение можно уменьшать в меньшей мере, чем частоту.

С учетом сказанного оптимальный режим работы асинхронного двигателя во всем диапазоне изменения частоты может быть обеспечен при соблюдении следующего соотношения между напряжением, частотой и моментом нагрузки:

$$\frac{U}{U_н} = k_1 \frac{f}{f_н} \sqrt{\frac{M}{M_н}}, \qquad (1\text{-}10)$$

где коэффициент $k_1 > 1$ при $f < f_н$. В машинных преобразователях с синхронными генераторами частота и напряжение изменяются пропорционально. Но все же при малой частоте вращения синхронные генераторы, несмотря на перевозбуждение, не всегда могут обеспечить достаточно высокне напряжения.

В генераторном режиме с уменьшением частоты статора момент машины сильно возрастает. Прнчиной этого является перемена знака падения напряжения на сопротивлениях статора, вследствие чего машина в этом режиме работает с повышенным магнитным потоком.

Следует заметить, что при высоких частотах вращения нельзя поддерживать постоянным магнитный поток из-за ограничения верхнего напряжения питания вследствие возможного пробоя изоляции машины. Можно также использовать асинхронный двигатель для работы при некотором еще допустимом для изоляции неизменном напряжении, но при увеличивающейся частоте питания н, следовательно, частоте вращения ротора. Однако в этом случае магнитный поток падает.

Работа рольганговых двигателей при изменении частоты питания от 30 до 75 Гц сопровождается изменением их критического скольжения от 1,1—1,7 до 0,5—0,7, что в обоих крайних случаях приводит к уменьшению пускового момента на 20—30% по сравнению с его значением прн частоте 50 Гц. При этом изменяется и максимальный момент двигателей.

Выразив известную зависимость максимального момента от основных параметров двигателя в виде

$$M_m \approx \frac{pm_1 (U_1/f_1)^2}{4\pi\sigma [r_1/f_1 + 2\pi (L_1 + \sigma L'_2)]}, \qquad (1\text{-}11)$$

можно заметить, что при пропорциональном уменьшении напряжения и частоты питающей сети максимальный момент асинхронного двигателя благодаря наличию сопротивления r_1 несколько снизится. Преобразовав формулу (1-11) к виду

$$M_m \approx \frac{pm_1 U^2_1}{4\pi f_1 x''_к (1 + r'_1/x''_к)}, \qquad (1\text{-}12)$$

можно определить, что, например, для $r'_1/x''_к = 0,1$ при 50 Гц это соотношение при 10 Гц будет равно 0,5, что вызовет снижение M_m по сравнению с M_m при 50 Гц примерно на 25%. Из уравнения (1-7) видно, что при включении рольганговых двигателей в сеть с частотой 30—10 Гц критическое скольжение увеличится в 1,7—5 раз по сравнению с критическим скольжением при 50 Гц.

Если при 50 Гц $s_m = 0,70 \div 1,0$, то при частотах 30—10 Гц критическое скольжение будет достигать значений от $s_m = 1 \div 3,9$ до $s_m = 1,3 \div 4,3$ и максимальный момент двигателей переместится в нерабочую часть механической характеристики — в область высоких скольжений тормозного режима. Это обстоятельство, а также уменьшение максимального момента на 15—20%, приведет при частоте 10 Гц к снижению пускового момента на 50% и более. С целью улучшения пусковых и динамических характеристик рольганговых двигателей для работы на низких частотах (30—10 Гц) в серии АР предусмотрена модификация низкочастотных двигателей, у которых сохраняются сердечники статора и ротора от основного исполнения 380 В, 50 Гц, но заливка клетки ротора производится чистым алюминием. Благодаря этому вдвое уменьшается критическое скольжение, достигая при частоте сети 20 Гц значений $s_m = 1,2 \div 1,4$. Обмоточные данные статорной обмотки изменены так, что при работе от сети 220 В, 20 Гц магнитный поток повышен в среднем на 20% по сравнению с двигателями основного исполнения. Это повышение магнитного потока увеличивает максимальный и начальный пусковой моменты на 30—40% по сравнению с режимом регулирования по закону $U/f = \mathrm{const}$ машин основного исполнения.

Таблица 1-8

Каталожные данные рольганговых двигателей серии АР $U = 220$ В, $f = 20$ Гц, соединение звездой

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	При пуске			В длительном режиме работы, ПВ=100%					Динамическая постоянная Д при ПВ %		
	Пусковой момент $M_к$	Пусковой ток $I_к$	Потери при к. з. $P_к$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cos φ	15	25	40
	Н·м/(кгс·м)	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹		
42-4	13,7/1,4	8	2,7	0,45	2,5	520	63	0,76	250	375	500
43-4	23,5/2,4	11	3,5	0,6	3,3	520	63	0,76	375	550	675
42-6	13,7/1,4	6	2,0	0,3	2,2	340	58	0,62	388	625	950
43-6	23,5/2,4	8	2,5	0,43	2,9	340	62	0,62	575	875	1375
42-8	13,7/1,4	5	1,5	0,23	2,5	250	40	0,60	450	750	1125
43-8	23,5/2,4	6,5	2,2	0,3	3,1	250	42	0,60	775	1125	1625
52-6	44,2/4,5	12	4,1	0,8	3,7	330	69	0,83	1375	1875	2630
53-6	68,6/7,0	14	5,5	1,2	5,4	330	70	0,84	1750	2250	3000
52-8	44,2/4,5	11	3,5	0,65	3,7	240	64	0,72	1500	2500	3000
53-8	68,6/7,0	14	4,2	0,9	5,0	240	65	0,73	2250	3750	4750
52-10	44,2/4,5	10	3,0	0,55	4,5	190	54	0,60	2000	3630	4500
53-10	68,6/7,0	14	3,9	0,75	5,6	190	58	0,61	3130	4880	5750
52-12	44,2/4,5	9	2,6	0,4	4,4	160	45	0,53	2250	3750	4380
53-12	68,6/7,0	12,5	3,6	0,6	6,2	160	48	0,53	3500	5750	6750
63-8	98,1/10	18	6,0	1,3	6,3	255	68	0,80	3000	5000	6750
64-8	137/14	25	8,5	1,9	8,9	255	70	0,80	3380	5750	8130

Продолжение табл. 1-8

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	При пуске			В длительном режиме работы, ПВ = 100%					Динамическая постоянная $Д$ при ПВ %		
	Пусковой момент $M_к$	Пусковой ток $I_к$	Потери при к. з. $P_к$	Номинальная мощность P_2	Ток I_1	Частота вращения	К. п. д.	cos φ	15	25	40
	Н·м/(кгс·м)	А	кВт	кВт	А	об/мин	%	—	кг·м²·ч⁻¹		
63-10	98,1/10	18	5,5	1,1	6,3	200	63	0,73	4250	5250	7000
64-10	137/14	24	7,5	1,4	7,8	200	65	0,73	5250	7000	9750
63-12	98,1/10	17	5,0	0,85	6,3	165	57	0,62	5000	6750	9250
64-12	137/14	22	6,5	1,2	8,5	165	60	0,62	6000	8500	12 100
63-16	88,3/9	13,5	3,8	0,5*	6,9	120	38	0,50	6250	8750	12 750
64-16	127/13	19	5,2	0,7*	9,0	120	41	0,50	8250	11 250	16 250
73-10	196/20	35	10,5	2,0	10,3	200	69	0,74	6250	10 500	12 500
74-10	274/28	45	13,5	2,8	13,3	200	69	0,80	9130	15 000	16 250
73-12	196/20	33	9,5	1,6	9,2	160	64	0,72	8620	14 500	15 750
74-12	274/28	38	11,5	2,3	13	160	66	0,70	12 130	20 500	21 250
73-16	196/20	24	6,5	1,1	11	125	51	0,51	10 500	18 000	20 500
74-16	274/28	37	10,5	1,6	14,4	125	54	0,54	16 750	28 300	28 800

* Мощности при ПВ = 70%.

Примечание. Динамическая постоянная для ПВ = 40% определена из условий допустимого превышения температуры обмотки статора 120°С, для ПВ = 15% и ПВ = 25% из условий разгона маховых масс до скорости 0,9 $n_с$.

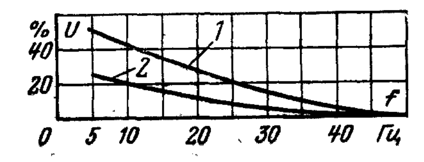


Рис. 1-12. Средние значения допустимого повышения напряжения в %.

1 — для двигателей АР4 и 5-го габаритов; *2* — для двигателей АР 6—8-го габаритов.

Уменьшение сопротивления клетки ротора и увеличение магнитного потока практически поставило на один уровень начальные пусковые моменты машин основного исполнения при 50 Гц и модификации для низких частот при 20 Гц.

Электродвигатели серии АР рассчитаны на номинальную частоту 50 Гц при 380 В и допускают работу при частотах от 5 до 85 Гц при пропорциональном изменении напряжения и частоты. При работе на низких частотах (ниже 40 Гц) уменьшаются потери в стали из-за снижения частоты и уменьшения индукции. При уменьшении частоты уменьшается индуктивное сопротивление, а активное сопротивление не изменяется. В результате увеличивается относительное значение полного сопротивления, поэтому падение напряжения в двигателе больше, что вызывает уменьшение магнитного потока, а следовательно, и индукции. Потери в стали при этом также уменьшаются. Все это создает тепловой запас в двигателе.

Однако при уменьшении магнитного потока в квадратичной зависимости уменьшаются начальный пусковой и максимальный моменты. Максимальный момент переходит в зону высоких скольжений тормозного режима. В пределах использования образующегося в двигателе теплового запаса допускается работа на несколько повышенном напряжении по сравнению с тем, которое пропорционально частоте. Это позволяет повысить пусковые качества двигателей.

Для двигателей основного исполнения (380 В, 50 Гц) на рис. 1-12 приведены средние значения допустимого повышения напряжения в процентах в зависимости от частоты по сравнению с напряжением, изменяющимся пропорционально частоте.

В табл. 1-8 приведены каталожные данные электродвигателей серии АР при 20 Гц, 220 В, соединение фаз звездой.

Глава вторая

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ

2-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ

Для проверки степени нагрева двигателей применяются как обычные методы, так и специально разработанные для серий рольганговых двигателей.

Точные расчеты могут быть проведены только на основе метода средних потерь с составлением уравнений теплового баланса.

В течение длительного времени широко применяется метод расчета нагрева двигателя по эквивалентному току статора. Он основан на предположении о постоянстве потерь в стали и потерь на трение во всех режимах работы, что не вполне точно, особенно в режимах торможения противотоком, которое часто применяется в приводе рольгангов. Известно, что серии рольганговых двигателей при номинальной частоте 50 Гц выпускаются на широкий диапазон частот вращения. Отношение тока статора при номинальной мощности к току холостого хода находится в пределах от 1 до 2. Чем больше полюсов у двигателя, тем меньше изменяется ток статора при увеличении нагрузки вплоть до номинальной, но ток ротора изменяется весьма значительно, а следовательно, значительно изменяются и потери в клетке ротора. Это также не учитывается в методе расчета нагрева двигателей по эквивалентному току.

Вследствие этого, а также с целью ускорения расчетов, для специальных серий рольганговых трехфазных асинхронных двигателей разработан метод выбора двигателей по так называемой динамической постоянной, которая с некоторым приближением характеризует действительные потери в двигателе. В рольганговых приводах часто встречаются нагрузки с небольшими постояными статическими моментами или нагрузки, обусловливающие малые изменения статорных токов. Для них удобно вести расчет двигателей на допустимое число циклов в час.

При выводе формулы динамической постоянной принято: момент инерции в кг·м^2, момент в Н·м, динамическая постоянная в кг·м^2·ч$^{-1}$.

Потери в фазе обмотки статора для любого значения тока можно представить в виде

$$I^2{}_1r_1=I^2{}_2r_2+I^2{}_xr_1.$$

Это выражение, приведенное для уточненной схемы замещения М. П. Костенко, запишем в виде

$$I^2_1 = I''^2_2 \frac{r''_2}{r_1} + I^2_x,$$

где $I''_2 = I'_{2o}{}^2$; I'_2 — ток ротора, приведенный в обмотке статора.

Из круговой диаграммы (рис. 2-1) видно, что

$$I^2_1 = I^2_x + 2I_x I''_2 \cos\alpha + I''^2_2,$$

где α — угол между векторами токов I_x и I''_2.

Если пренебречь углом между линиями $D_к$ и I_x, то

$$\cos\alpha = I''_2 / D_к,$$

где $D_к$ — диаметр круга круговой диаграммы.

Для рольганговых двигателей угол между линиями $D_к$ и I_x составляет $\pm 3°$. В связи с этим фактические потери будут незначительно отличаться от потерь, рассчитанных по приведенной выше формуле. Эта разница не превосходит нескольких процентов и при практических расчетах ею можно пренебречь.

Тогда

$$I^2_1 = I^2_x + 2\frac{I_x}{D_к} I''^2_2 + I''^2_2 = I''^2_2 \left(1 + 2\frac{I_x}{D_к}\right) + I^2_x.$$

Потери $I^2_1 r_1 = I''^2_2 r_1 \left(1 + 2\frac{I_x}{D_к}\right) + I^2_x r_1.$

Следовательно, потери в обмотке статора

$$P_{м1} = P_{м2} \frac{r_1}{r''_2} \left(1 + 2\frac{I_x}{D_к}\right) + P_{x.м1},$$

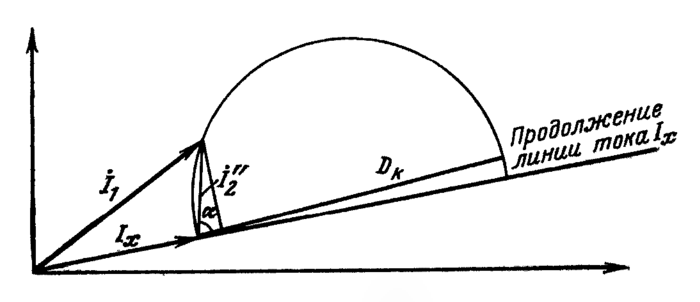


Рис. 2-1. Круговая диаграмма двигателя.

где $P_{x.м1}$ — потери в обмотке статора при холостом ходе.

Электромагнитная мощность, передаваемая со статора на ротор, как известно, выражается формулой

$$P_{12}=\frac{P_{м2}}{s}, \text{ т. е. } P_{м2}=P_{12}s, \; P_2=P_{12}(1-s).$$

Вращающий момент $M=9{,}55\,P_2/n$, где P_2 — в Вт; M—в Н·м.

Средний момент, Н·м, необходимый для ускорения разгоняемых масс за время t, с,

$$M=\frac{n\Sigma J}{9{,}55t};\; t=\frac{n\Sigma J}{9{,}55M}.$$

Скольжение

$$s=\frac{n_c-n}{n_c}.$$

Потери энергии в обмотке ротора при разгоне определяются по формуле

$$A_{м2}=\int_0^t P_{м2}\,dt,$$

где

$$P_{м2}=P_{12}s=\frac{P_2 s}{1-s}=\frac{P_2\dfrac{n_c-n}{n_c}}{1-\dfrac{n_c-n}{n_c}}=\frac{P_2(n_c-n)}{n}=$$

$$=\frac{Mn(n_c-n)}{9{,}55n}=\frac{M(n_c-n)}{9{,}55};$$

$$M=\Sigma J\frac{d\omega}{dt}=\Sigma J\frac{2\pi}{60}\frac{dn}{dt}=\frac{\Sigma J}{9{,}55}\frac{dn}{dt}.$$

Подставим теперь $P_{м2}$ и M в основную формулу потерь энергии в роторе и, заменяя пределы интегрирования, получаем:

$$A_{м2}=\int_0^t P_{м2}\,dt=\int_0^t\frac{M(n_c-n)\,dt}{9{,}55}=$$

$$=\frac{\Sigma J}{9{,}55^2}\int_{n_1}^{n_2}(n_c-n)\,dn=\frac{\Sigma J}{9{,}55^2}\left[n_c(n_2-n_1)-\frac{n_2^2-n_1^2}{2}\right].$$

Если $n_1 = 0$ а $n_2 = n_c$, то

$$A_{м2} = \frac{n^2_c \Sigma J}{2 \cdot 9{,}55^2} = \frac{4 n^2_c \Sigma J}{730}.$$

При торможении противотоком $n_1 = -n_c$, $n_2 = 0$

$$A_{м2торм.противотоком} = \frac{3 \cdot 4 \Sigma J}{730} n^2_c = 3 A_{м2}.$$

При этом предполагается, что моменты двигателя в процессе ускорения и торможения и схемы включения одинаковы.

Потери при пуске и торможении противотоком в роторе

$$A_{рев} = A_{м2} + 3 A_{м2} = 4 A_{м2}.$$

Потери в роторе при разгоне двигателя можно получить и другим путем.

Электромагнитная мощность, передаваемая со статора на ротор,

$$P_{12} = M\omega_c,$$

тогда

$$P_{м2} = M\omega_c s;$$

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} \quad \text{или} \quad \omega = \omega_c - \omega_c s = \omega_c (1 - s).$$

Взяв производную, получим:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_c \frac{ds}{dt}.$$

Вращающий момент определится как

$$M = \Sigma J \frac{d\omega}{dt} = -\omega_c \Sigma J \frac{ds}{dt} \quad \text{или} \quad dt = -\frac{\omega_c \Sigma J}{M} ds.$$

Подставив выражения $P_{м2}$ и dt в формулу потерь в роторе при пуске, получим:

$$A_{м2} = \int_0^t P_{м2}\, dt = \int_{s_1}^{s_2} -M\omega_c s \frac{\omega_c \Sigma J}{M} ds =$$

$$= \int_{s_2}^{s_1} \omega^2_c s \Sigma J\, ds = \omega^2_c \Sigma J \int_{s_2}^{s_1} s\, ds.$$

При пуске двигателя из неподвижного состояния до синхронной скорости ($s_1=1$, $s_2=0$) и

$$A_{м2}=\omega^2_с\Sigma J\int\limits_0^1 s\,ds=\frac{\omega^2_с\Sigma J}{2}.$$

Полученное выражение потерь в обмотке ротора равно кинетической энергии при разгоне вращающихся масс с радиусом инерции $D/2$, м, и моментом инерции J, кг·м^2.

Так как $\omega_с=\frac{2\pi n_с}{60}$, то

$$A_{м2}=\frac{\omega^2_с\Sigma J}{2}=\left(\frac{2\pi n_с}{60}\right)^2\frac{\Sigma J}{2}=\frac{4n^2_с\Sigma J}{730}.$$

Потери в двигателе при пуске будут:

$$A=P_{м2}+P_{м1}=P_{м2}+P_{м2}\left(1+2\frac{I_х}{D_к}\right)\frac{r_1}{r''_2}+P_{х.м1}=$$

$$=P_{м2}\left[1+\left(1+2\frac{I_х}{D_к}\right)\frac{r_1}{r''_2}\right]+P_{х.м1}=\frac{4n^2_с\Sigma J}{730}\times$$

$$\times\left[1+\frac{r_1}{r''_2}\left(1+\frac{2I_х}{D_к}\right)\right]+P_{х.м1}.$$

Таким образом, тепловую энергию, выделяемую в двигателе при повторно-кратковременном режиме работы с учетом работы с некоторой нагрузкой за один рабочий цикл, можно определить по формуле [Л. 16]

$$A_ц=\frac{4Kn^2_с\Sigma J}{730}\left[1+\frac{r_1}{r''_2}(1+2\varepsilon)\right]+P_хt_в+P_нt_н, \quad (2\text{-}1)$$

где ΣJ — суммарный момент инерции системы рольганг — двигатель, приведенный к валу двигателя, кг·м^2; K — коэффициент, зависящий от режима работы (характера цикла) двигателя; ε — отношение тока холостого хода к диаметру окружности круговой диаграммы двигателя; $P_х$ — потери холостого хода двигателя, Вт; $t_в$ — продолжительность разбега, торможения и холостого хода, с; $t_н$ — продолжительность работы под нагрузкой, с.

Первый член уравнения (2-1) выражает потери в обмотках статора и ротора, обусловленные ускорением и торможением маховых масс. Второй член уравнения учитывает потери холостого хода. Третий член выражает потери в двигателе при работе под нагрузкой.

Обычно в рольганговых двигателях ток при статической нагрузке невелик — примерно равен току холостого хода. Поэтому потери при статической нагрузке можно считать примерно равными потерям холостого хода. В этом случае третий член уравнения можно исключить и понимать под $t_в$ суммарную продолжительность включения, которую обычно обозначают через ПВ,%.

Потери энергии холостого хода за 1 ч можно выразить следующим образом:

$$A_{x2} = P_x \cdot 3600 \frac{ПВ}{100}. \qquad (2\text{-}2)$$

Энергия, потребляемая двигателем в час, при Z циклах в час будет:

$$A_0 = \frac{4Kn^2_c Z\Sigma J}{730}\left[1 + \frac{r_1}{r''_2}(1+2s)\right] + P_x \cdot 3600 \frac{ПВ}{100}. \qquad (2\text{-}3)$$

Допустимое количество тепла, выделяемое двигателем в 1 ч, выразим через перепад температуры обмотки статора в следующем виде:

$$A_{доп} = \Theta_{м1} S_{охл} \alpha \cdot 3600, \qquad (2\text{-}4)$$

где $S_{охл}$ — охлаждающая поверхность сердечника статора, м^2:

$$S_{охл} = \pi D_a l + 2\pi \frac{D^2_a}{4},$$

где D_a — наружный диаметр сердечника статора; l — длина сердечника статора; α — условный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к охлаждающей поверхности сердечника; $\Theta_{м1}$ — допускаемое превышение температуры обмотки статора.

Приравнивая в установившемся режиме нагрева $A_0 = A_{доп}$ и решая относительно Z, получаем допустимое число циклов в час:

$$Z = \frac{\Theta_{м1} S_{охл} \alpha \cdot 3600 - P_x \cdot 3600 \frac{ПВ}{100}}{4K \frac{n^2_c}{730} \Sigma J \left[1 + \frac{r_1}{r''_2}(1+2s)\right]}. \qquad (2\text{-}5)$$

При данном ПВ все члены правой части, кроме ΣJ и K, можно объединить одной буквой $Д$, кг·м^2·ч$^{-1}$ — так называемой динамической постоянной. Следовательно,

$$Z = \frac{Д}{K\Sigma J},$$

где

$$Д=\frac{\Theta_{\text{м}1}S_{\text{охл}}\alpha\cdot 3600-P_{\text{х}}\cdot 3600\,\frac{\text{ПВ}}{100}}{4\,\frac{n^2_{\text{с}}}{730}\left[1+\frac{r_1}{r''_2}(1+2\varepsilon)\right]}, \quad (2\text{-}6)$$

откуда

$$Д=KZ\Sigma J. \quad (2\text{-}7)$$

Динамическая постоянная равна сумме моментов инерции, которые двигатель, работая без статической нагрузки в течение часа при заданном ПВ, способен разогнать до синхронной скорости при условии, что при некоторой температуре окружающей среды превышение температуры его статорной обмотки не превзойдет допустимой величины. $Д$ зависит от $\Theta_{\text{м}1}$, так как по своему существу динамическая постоянная определяется из условия допустимого превышения температуры обмотки статора, а не других частей двигателя (стали статора и ротора, оболочки — станина и щиты), превышение температуры которых не нормируется и имеет меньшее значение.

Счнтать α средним коэффициентом теплоотдачи с оболочки нельзя, так как он будет значительно меньше условного коэффициента теплоотдачи с поверхности $S_{\text{охл}}$ и динамическая постоянная будет сильно занижена. Можно было бы принять за $S_{\text{охл}}$ всю наружную поверхность двигателя, включая станину и подшипниковые щиты, и для нее выбрать свой средний коэффициент теплоотдачи. В этом случае произведение $S_{\text{охл.обол}}\alpha_{\text{ср.обол}}$ отражало бы действительную теплоотдачу двигателя, т. е.

$$S_{\text{охл.обол}}\alpha_{\text{ср.обол}}=S_{\text{охл}}\alpha.$$

Но станина и щиты имеют довольно сложную конфигурацию и их поверхности в разных местах не равноценны по теплоотдаче. Поэтому расчет действительной эффективной поверхности для общего среднего коэффициента теплоотдачи (излучение и конвекция) чрезвычайно затрудняется. Поверхность охлаждения сердечника рассчитывается просто. Определение среднего коэффициента теплоотдачи представляет сложную и трудоемкую задачу. Именно поэтому с целью значительного упрощения принято равнозначное значение произведения поверхности активной стали на условный коэффициент

теплоотдачи с этой поверхности. Это равнозначно произведению действительной охлаждающей поверхности оболочки на усредненный коэффициент теплоотдачи с этой поверхности.

Если двигатель при реверсировании разгоняется в разные стороны до различных скоростей, то динамическая постоянная выразится следующей формулой:

$$Д = ZK\left(\frac{n_1+n_2}{2n_c}\right)^2 \Sigma J,$$

где n_1 — достигаемая частота вращения при вращении влево; n_2 — достигаемая частота вращения вправо.

Обозначим коэффициент разгона двигателя

$$\alpha'_p = \left(\frac{n_1+n_2}{2n_c}\right)^2.$$

Примем с некоторым запасом

$$\alpha_p = \frac{n_1+n_2}{2n_c} \qquad (2\text{-}8)$$

и напишем динамическую постоянную в окончательном виде

$$Д = KZ\alpha_p \Sigma J, \qquad (2\text{-}9)$$

где α_p обычно не должен быть ниже 0,9.

Коэффициент кратности потерь K, зависящий от режима работы, является функцией скольжения при установившемся режиме работы.

Для разбега из неподвижного состояния до $n = n_c(1-s)$

$$K=1-s.$$

Для разбега и динамического торможения

$$K=2(1-s).$$

Для разбега и торможения противотоком

$$K=4(1-s).$$

Для двух реверсов

$$K=8(1-s).$$

Так как при определении динамической постоянной принято пренебрегать статической нагрузкой ввиду ее малости, то, следовательно, и $s=0$.

Отсюда для пуска с самоторможением $K=1$, для пуска с динамическим торможением $K=2$, для пуска и

Таблица 2-1

Динамическая постоянная Д электродвигателя АРФ 43-6 при различных $K_к$ и одном и том же превышении температуры обмотки статора

$K_к$	6,14	10	30,6
Z	782	487	156
$Д$ при ПВ = 40%, кг·м²·ч⁻¹	302	307	302

торможения противотоком K=4. При принятых значениях коэффициентов K под циклом понимается пуск и торможение двигателя.

В практике металлургических заводов отношение суммарного приведенного к валу двигателя момента инерции нагрузки и ротора к моменту инерции ротора

$$K_к = \Sigma J / J_{рот} \qquad (2\text{-}10)$$

лежит в широких пределах — от нескольких единиц до 30—40 и даже до 50. При опытном определении динамических постоянных $K_к$ принимается для двигателей 4-го габарита — около 10, для двигателей 5—7-го габаритов — от 4 до 7.

Опытная проверка динамической постоянной на электродвигателе АРФ 43-6 (табл. 2-1) подтвердила, что зависимость $Z\Sigma J$=const сохраняется в широком диапазоне.

В табл. 1-6 и 1-7 указаны динамические постоянные рольганговых двигателей. Эта константа наряду с пусковым моментом является важнейшим параметром, характеризующим способность этих двигателей разгонять и реверсировать приводимые ими в движение маховые массы. Увеличение динамической постоянной двигателей с увеличением числа полюсов объясняется тем, что потери в обмотке ротора $P_{м2}$ пропорциональны кинетической энергии разгоняемых масс

$$P_{м2} \sim \omega_2^2 \Sigma J,$$

где ω_2 — угловая скорость ротора.

Этим потерям в первом приближении пропорциональны и потери в обмотке статора $P_{м1}$. Следовательно, динамическая постоянная двигателя приблизительно обратно пропорциональна квадрату его синхронной угловой скорости, так как при естественном охлаждении отводимые закрытыми двигателями потери практически не зависят от частоты вращения ротора.

В циклах без холостого хода ПВ нельзя изменять произвольно, так как она получается из среднего момента $M'_{ср}$ и момента инерции ΣJ. Общие потери эиергии в этом случае равны:

$$A_ц = Z \cdot 4K\Sigma J \left\{ \frac{n^2_с}{730} \left[1 + \frac{r_1}{r''_2} (1 + 2s) \right] + \frac{P_х n_с K_ц}{9{,}55 M'_{ср} K} \right\}, \quad (2\text{-}11)$$

где ΣJ в кг·м².

Коэффициент $K_ц$ также зависит от характера рабочего цикла. Динамическая постоянная при этом будет:

$$Д_1 = \frac{\Theta_{м1} S_{охл} \alpha \cdot 3600}{4 \frac{n^2_с}{730} \left[1 + \frac{r_1}{r''_2} (1 + 2s) \right] + \frac{P_х n_с K_ц}{9{,}55 M'_{ср} K}}. \quad (2\text{-}12)$$

Время, затрачиваемое на ускорение и торможение в течение одного цикла, можно выразить формулой [Л. 19]

$$t_в = \frac{n_с K_ц \Sigma J}{9{,}55 M'_{ср}}, \quad (2\text{-}13)$$

где $M'_{ср}$ — идеальный средний момеит, определяемый из уравнения

$$\frac{n_с \cdot 2 (s - 1) \Sigma J}{9{,}55 M'_{ср}} = \frac{n_с \Sigma J}{9{,}55 M_m} \left(\frac{1 - s}{s_m} + \frac{s_m}{2} \ln \frac{2 - s}{s} \right). \quad (2\text{-}14)$$

Для рольганговых двигателей $M'_{ср}$ можно принять примерно равным 80% максимального момента:

$$ПВ = \frac{n_с K_ц s \Sigma J}{9{,}55 M'_{ср} \cdot 36}, \ \%. \quad (2\text{-}15)$$

Для цикла, состоящего только из ускорения и торможения, без холостого хода и работы под нагрузкой, ПВ получается принудительно, так как она не зависит от числа циклов.

Динамическая постоянная зависит от ПВ и дается для рольганговых электродвигателей при трех (или нескольких) каталожных значениях ПВ=15, 25 и 40%. Это позволяет учитывать потери холостого хода в зависимости от времени работы двигателя. Если действительная ПВ не совпадает ни с одним из каталожных значений, то должен быть произведен пересчет динамической постоянной на эту ПВ.

Пересчет динамической постоянной для допустимого превышения температуры обмотки статора производится

по эмпирической зависимости. Например, если известна $Д$ при 120°С, а требуется определить $Д$ при 90°С, то

$$Д_{90}=Д_{120}\frac{90}{120}0{,}9.$$

Коэффициент 0,9 учитывает отклонеиие от прямолинейной зависимости в интервале превышений температуры от 90 до 120°С.

2-2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТЕ, ОТЛИЧНОЙ ОТ 50 Гц

Если в течение 1 ч происходит Z_1 пусков с моментом инерции ΣJ_1, Z_2 динамических торможений с моментом инерции ΣJ_2, Z_3 торможений противотоком с моментом инерции ΣJ_3, то суммарные потери, выделенные в двигателе в течение 1 ч работы, будут:

$$A_1=\frac{K_1}{2}\omega^2_c(Z_1\Sigma J_1+Z_2\Sigma J_2+3Z_3\Sigma J_3)+P_x t_p, \qquad (2\text{-}16)$$

где t_p — общее время работы; ω_c — угловая синхронная частота при 50 Гц, K_1 — коэффициент цикла.

Относительная продолжительность включения двигателя

$$ПВ=t_p/3600.$$

Следовательно, уравнение (2-16) может быть представлено в виде

$$A_1=\frac{K_1}{2}\omega^2_c(Z_1\Sigma J_1+Z_2\Sigma J_2+3Z_3\Sigma J_3)+3600P_x\cdot ПВ. \qquad (2\text{-}17)$$

Заменяя синхронную угловую скорость при частоте 50 Гц на $\omega_{cf}=\omega_c f/50$ — угловую скорость при частоте f, представим уравнение (2-17) в виде

$$A_1=\frac{K_1}{2}\omega^2_{cf}(Z_1\Sigma J_1+Z_2\Sigma J_2+3Z_3\Sigma J_3)\left(\frac{50}{f}\right)^2+3600P_x\cdot ПВ. \qquad (2\text{-}18)$$

Эти суммарные потери в двигателе не должны превосходить допустимые потери. Обозначив через $A_{доп}$ допустимые потери двигателя в час, на основании уравнения (2-18) получим:

$$K_1(Z_1\Sigma J_1+Z_2\Sigma J_2+3Z_1\Sigma J_3)\left(\frac{50}{f}\right)^2\leqslant$$

$$\leqslant\frac{2}{\omega^2_{cf}}(A_{доп}-3600P_x\cdot ПВ). \qquad (2\text{-}19)$$

Левую часть неравенства (2-19) назовем динамической постоянной при частоте f:

$$Д_f=(Z_1\Sigma J_1+Z_2\Sigma J_2+3Z_3\Sigma J_3)\left(\frac{50}{f}\right)^2 K_1. \qquad (2\text{-}20)$$

Поэтому допустимая динамическая постоянная при частоте f равна:

$$Д_{\text{доп}f}=\frac{2}{\omega^2_{cf}}(A_{\text{доп}}-3600P_{\text{х}}\cdot \text{ПВ})=$$

$$=\frac{730}{4n^2_{cf}}(A_{\text{доп}}-3600P_{\text{х}}\cdot \text{ПВ}), \qquad (2\text{-}21)$$

так как $\omega_{cf}=2\pi n_{cf}/60$.

Потери холостого хода состоят из потерь в обмотке статора, потерь в стали, механических и добавочных потерь. Ввиду малого их значения пренебрежем добавочными потерями. Потери в стали зависят от частоты в степени 1,3—1,5. Примем, для примера, 1,5.

$$P_{cf}=P_{c50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,5}.$$

При пропорциональном изменении напряжения и частоты считаем ток холостого хода не зависящим от частоты, хотя в действительиости из-за увеличенного падения напряжения в активном сопротивлении с уменьшением частоты ток несколько уменьшается.

Механические потери $P_{\text{мех}f}$ при частоте f

$$P_{\text{мех}f}=P_{\text{мех}50}\left(\frac{f}{50}\right).$$

Тогда потери холостого хода можно представить в виде

$$P_{\text{х}f}=3r_1I^2_{\text{х}50}+P_{c50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,5}+P_{\text{мех}50}\left(\frac{f}{50}\right)=$$

$$=\frac{r_1}{r_m}\cdot 3r_mI^2_{\text{х}50}+P_{c50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,5}+P_{\text{мех}50}\left(\frac{f}{50}\right)=$$

$$=\frac{r_1}{r_m}P_{c50}+P_{c50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,5}+P_{\text{мех}50}\left(\frac{f}{50}\right). \qquad (2\text{-}22)$$

Пренебрегая механическими потерями, получаем:

$$P_{\text{х}f}=\left[\frac{r_1}{r_m}+\left(\frac{f}{50}\right)^{1,5}\right]P_{c50}.$$

Обозначив для сокращения $\gamma=r_1/r_m$, получим:

$$P_{\text{х}f}=\left[\gamma+\left(\frac{f}{50}\right)^{1,5}\right]P_{c50}, \qquad (2\text{-}23)$$

где r_m — активное сопротивление намагничивающей цепи.

Подставив полученное значение потерь холостого хода в уравнение (2-21), получим:

$$Д_{допf} = \frac{730}{4n^2{}_{cf}} \left\{ A_{доп} - 3600 \left[\gamma + \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \right] \right\} P_{c50} \cdot ПВ. \quad (2\text{-}24)$$

Уравнение (2-24) представится в виде [Л. 15]

$$Д_{допf} = a - b \left[\gamma + \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \right] ПВ. \quad (2\text{-}25)$$

Величины a и b являются постоянными для данного двигателя.

Таким образом, допустимая динамическая постоянная, определяемая из условий нагревания двигателя, является линейной функцией относительной продолжительности включения и зависит от частоты сети.

Если известны значения динамических постоянных при частоте 50 Гц и при двух разных ПВ, то постоянные a и b в уравнении (2-25) могут быть легко определены следующим образом:

$$Д_{ПВ1} = a - b(\gamma + 1)ПВ_1; \quad Д_{ПВ2} = a - b(\gamma + 1)ПВ_2;$$

$$Д_{ПВ1} - Д_{ПВ2} = b(\gamma + 1)(ПВ_2 - ПВ_1);$$

$$b = \frac{Д_{ПВ1} - Д_{ПВ2}}{(\gamma + 1)(ПВ_2 - ПВ_1)}; \quad (2\text{-}26)$$

$$a = Д_{ПВ1} + \frac{ПВ_1}{ПВ_2 - ПВ_1}(Д_{ПВ1} - Д_{ПВ2}). \quad (2\text{-}27)$$

Исходя из (2-26) и (2-27), можно по уравнению (2-25) найти $Д_{доп}$ для интересующих нас условий.

Пренебрегая отношением r_1/r_m ввиду его малого значения, указанные выше уравнения можно значительно упростить:

$$Д_{доп} = a - b\,ПВ;$$

$$\left. \begin{aligned} Д_{ПВ1} &= a - bПВ_1; \\ Д_{ПВ2} &= a - bПВ_2; \end{aligned} \right\} \quad (2\text{-}28)$$

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{Д_{ПВ1} - Д_{ПВ2}}{ПВ_2 - ПВ_1}; \\ a &= \frac{Д_{ПВ1}ПВ_2 - Д_{ПВ2}ПВ_1}{ПВ_2 - ПВ_1}. \end{aligned} \right| \quad (2\text{-}29)$$

На основании этих уравнений по известным динамическим постоянным для двух рядом расположенных значений ПВ легко определяются постоянные a и b, а следовательно, легко определяется и $Д_{доп}$.

Расчет динамической постоянной $Д_f$ при частоте f можно производить и путем сравнения с динамической постоянной $Д_{50}$ при 50 Гц:

$$Д_f = Д_{50} C_f.$$

Коэффициент C_f в этом случае должен определяться по результатам стендовых испытаний двигателей.

При определении C_f по формуле $C_f = \left(\frac{50}{f}\right)^2$ значения динамических постоянных для низких частот (ниже 30 Гц) и особенно при 10 Гц получаются резко завышенными против действительных значений. Все дело в том, что при частотах 40—50 Гц и при более высоких частотах справедливые результаты дает расчет динамической постоянной, производимый из условий тепловых соображений при максимально допустимом превышении температуры обмотки статора. При частотах ниже 30 Гц, а также при малых значениях ПВ и частотах даже выше номинальной длительность включения из-за большого числа возможных включений столь коротка, что двигатель не успевает полностью разогнаться и коэффициент разгона намного меньше единицы. Двигатель в этих случаях не достигает предельного превышения температуры обмотки статора, что подтверждается опытом. При этом расчет динамической постоянной целесообразнее производить по формуле, полученной из условия заданного коэффициента разгона.

Выведем эту формулу. Время цикла $t_ц = t_п + t_т + t_у$. Здесь время пуска $t_п = n\Sigma J / 9{,}55 M_п$, время торможения $t_т = n\Sigma J / 9{,}55 M_т$ и время работы с установившейся скоростью $t_у = 0$.

С некоторым приближением можно принять $M_п = M_m(1{,}1 - 0{,}5\alpha_р)$, где $\alpha_р = n/n_с$ — коэффициент разгона. Если принять $M_т = 0{,}9 M_m$ при $\alpha_р = 0{,}4$, тогда

$$t_п + t_т = \frac{\alpha_р n_с \Sigma J}{9{,}55 M_m (1{,}1 - 0{,}5\alpha_р)} + \frac{\alpha_р n_с \Sigma J}{9{,}55 \cdot 0{,}9 M_m} =$$

$$= \frac{\alpha_р n_с \Sigma J}{9{,}55 M_m} \left(\frac{1}{1{,}1 - 0{,}5\alpha_р} + \frac{1}{0{,}9}\right) = \frac{\alpha_р n_с \Sigma J}{9{,}55 M_m} \left(\frac{2 - 0{,}5\alpha_р}{0{,}99 - 0{,}45\alpha_р}\right).$$

Число возможных реверсов с учетом времени разгона и торможения составит:

$$Z = \frac{3600 \cdot ПВ}{t_п + t_т} = \frac{36 \cdot ПВ\%}{t_п + t_т} = \frac{36 \cdot 9,55 M_m (0,99 - 0,45\alpha_р) ПВ\%}{\Sigma J \alpha_р n_с (2 - 0,5\alpha_р)}.$$

Избавимся от дробных коэффициентов при коэффициенте разгона, умножив числитель и знаменатель сначала на 2, а потом на 2,22. После преобразований получим:

$$Z = \frac{310 M_m ПВ\%}{\alpha_р n_с \Sigma J} \left(\frac{2,2 - \alpha_р}{4 - \alpha_р}\right).$$

Но при торможении противотоком $Z = Д/4\alpha_р \Sigma J$. Тогда

$$\frac{Д}{4g \Sigma J \alpha_р} = \frac{310 M_m ПВ\%}{\alpha_р n_с \Sigma J} \left(\frac{2,2 - \alpha_р}{4 - \alpha_р}\right)$$

или

$$Д = \frac{12\,150 M_m ПВ\%}{n_с} \left(\frac{2,2 - \alpha_р}{4 - \alpha_р}\right), \quad (2\text{-}30)$$

$$ПВ\% = \frac{Д n_с}{12\,150 M_m} \left(\frac{4 - \alpha_р}{2,2 - \alpha_р}\right).$$

При других значениях $M_п$, а также при других значениях $M_т$ для соответствующих $\alpha_р$, формула (2-30) будет иметь несколько иной вид.

Расчетные средние значения коэффициента C_f, произведенные с учетом приведенных соображений для двигателей серии АР при разных ПВ, представлены в табл. 2-2.

Опытная проверка показала, что определение коэффициента C_f таким путем является наиболее приемлемой для получения гарантированных значений динамической постоянной при разных частотах.

Таблица 2-2

Значения C_f при разных частотах

ПВ, %	Значения C_f при частотах, Гц							
	10	20	30	40	50	60	70	85
15	4,5	3,5	2,5	1,56	1	0,7	0,51	0,35
25	5,5	4,0	2,6	1,56	1	0,7	0,51	0,35
40	7,0	5,0	2,7	1,56	1	0,7	0,51	0,35

Увеличение динамической постоянной при больших ПВ низкочастотных двигателей объясняется тем, что при низких частотах величину динамической постоянной ограничивает не нагрев, а время разгона двигателей до подсинхронной скорости (0,95 от синхронной), так что при больших ПВ двигатель за каждый цикл успевает разгонять большие маховые массы.

Таким образом, проверка двигателей на нагревание по динамической постоянной производится следующим образом.

Сумма моментов ΣJ определяется предварительными расчетами по технологическому процессу прокатки или транспортировки металла. Число циклов Z, вид торможения и продолжительность включения ПВ также определяются технологическим процессом. Коэффициент разгона α_p определяется по формуле (2-8). Обычно α_p принимается равным 1. Затем по формуле (2-9) определяется требуемая динамическая постоянная двигателя при заданных ПВ и частоте сети.

Полученную динамическую постоянную сравнивают с каталожной (при одинаковых ПВ и частоте сети). Если она меньше каталожной, то двигатель пригоден для выбранного режима работы, если же она больше каталожной, то двигатель перегреется.

2-3. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ РОЛЬГАНГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Как уже отмечалось, основными характеристиками рольганговых двигателей являются начальный пусковой момент и динамическая постоянная. Поэтому экономическое сравнение разных серий (или типов) производится не по мощности (с учетом к. п. д. и $\cos\varphi$), а по начальному пусковому моменту и динамической постоянной. Для сравнения выбираются двигатели на одинаковую частоту вращения и имеющие близкие начальные пусковые моменты. Небольшая разница пусковых моментов сравниваемых двигателей учитывается соответствующим (пропорциональным) изменением динамической постоянной одного из двигателей.

Экономическое сравнение эквивалентных двигателей двух серий производится по расходам основных активных и конструктивных материалов с пересчетом на одинаковую динамическую постоянную с учетом заработ-

ной платы на сравниваемые изделия. Остальные составляющие себестоимости изделий приняты неизменными, постоянными.

Ниже приведен пример сравнения двух рольганговых двигателей серий АР и АЗР.

Каталожные данные двигателей:

	АР 64-12	АЗР 44-12
$М_к$, Н·м	137	157
$Д$, кг·м²·ч⁻¹ . .	3070	1875

Принимая за основной $М_к$=137 Н·м, изменяем динамическую постоянную двигателя АЗР 44-16. Сравниваемая динамическая постоянная этого двигателя будет: $1875 \frac{137}{157} = 1635.$

Коэффициент приведения изменяющихся расходов активных материалов двигателя АЗР 44-16 к единой динамической постоянной равен:

$$\frac{3070}{1635} = 1,87.$$

В табл. 2-3 дано сравнение эквивалентных двигателей по расходу основных материалов с пересчетом на одинаковую динамнческую постоянную. Цены на материалы заимствовались из соответствующих прейскурантов за 1966 г.

Заработная плата для изготовления двигателей АР 64-12 и АЗР 44-12 соответственно составляла 10,34 и 11,30 руб.

Из сравнения экономии за счет активных материалов и заработной платы видно, что экономия за счет заработной платы составляет малую величину.

Экономия за счет активных, конструктивных материалов и заработной платы составляет 63,65 руб.

В расчете экономической эффективности следует учитывать действительный срок службы электродвигателей, убытки от простоя прокатных станов, затраты на обслуживание двигателей в процессе эксплуатации и резервный парк двигателей. Практика эксплуатации показала, что фактический срок службы двигателей серии АР во много раз больше, чем двигателей серии АЗР.

Таблица 2-3

Сравнение расхода основных материалов для электродвигателей АР 64-12 и АЗР 44-12

АР 64-12			АЗР 44-12			
Наименование материалов	Расход	Стоимость материалов, руб.	Наименование материалов	Расход	Расход, приведенный к единой $Д$	Стоимость материалов, руб.
Сталь Э12, кг	148,0	20,72	Сталь Э12, кг	202,0	378,0	53,00
Чугун (литье) СЧ15-32, кг	147,6	3,61	Чугун (литье) СЧ15-32, кг	149,9	281,0	45,00
Валовая сталь марки 35, кг	19,7	1,42				
Медь обмоточная ПСДК ⌀1,25, кг	9,5	22,10	Валовая сталь марки 35, кг	24,3	45,6	3,28
			Медь обмоточная ПСД ⌀1,35; кг	11,5	21,6	29,70
Алюминиево-магниевый сплав клетки ротора, кг	2,7	1,34	Стержни—марганцовистая латунь, кольца медные, кг	8,16	15,25	15,32
Стекломиканит Г2ФК II, кг	1,096	19,0				
Стеклолакоткань ЛСК, м	5,395	12,95	Миканит ГФС2, кг	0,986	1,845	19,20
Лак пропиточный КО-916 К, кг	1,5	7,5	Лакоткань ЛСБ, м	4,13	7,72	5,87
Привод выводиой РКГМ, м	0,765	0,69	Лак пропиточный 447, кг	2,8	5,26	2,26
			Провод выводной ПРГ-500, м	0,7	0,7	0,05
Итого:		110,03	Итого:			173,68

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА РОЛЬГАНГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3-1. РАБОТА РОЛЬГАНГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ УСТАНОВКЕ ИХ ПОД РАЗНЫМИ УГЛАМИ НАКЛОНА

Когда двигатель устанавливается так, что ось вала расположена под углом к горизонтали, дополнительная осевая нагрузка не должна превышать веса полумуфты или шестерни. При этом заказчик должен предусматривать дополнительное уплотнение для предохранения от попадания масла или другой жидкости внутрь двигателя.

В настоящем параграфе приводятся результаты исследования влияния угла наклона на тепловое состояние обмоток асинхронных рольганговых двигателей серии АР.

Охлаждение рольганговых двигателей серии АР, имеющих кольцевые ребра на станинах и вертикальные ребра на щитах, осуществляется путем теплоотдачи выделяющегося в двигателе тепла в окружающий воздух путем излучения и естественной конвекции.

При высоких и близко расположенных ребрах за эффективную поверхность для определения излучения принимается внешняя огибающая поверхность оребренного двигателя. Коэффициент теплоотдачи излучением, определяемый по известному закону Стефана — Больцмана, при изменении угла наклона двигателя не изменяется.

Коэффициент теплоотдачи путем естественной конвекции зависит как от размеров, так и от расположения охлаждаемой поверхности по отношению к горизонту: коэффициент теплоотдачи с горизонтальных поверхностей больше, чем с вертикальных поверхностей. Поэтому, хотя в рольганговых двигателях охлаждение осуществляется как излучением, так и естественной конвекцией, изменение теплового состояния можно объяснить только изменением коэффициента теплоотдачи естественной конвекцией. Аналитический расчет коэффициентов теплоотдачи естественной конвекцией при изменении угла наклона представляет сложную задачу, поэтому исследование изменения теплового состояния двигателей проведено опытным путем.

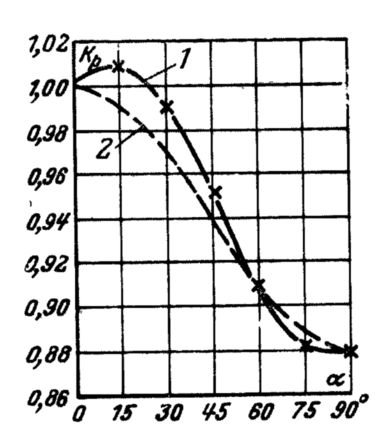


Рис. 3-1. Изменение $K_р$ по средним значениям для двигателей серии АР.

Основным режимом работы рольганговых двигателей является режим частых пусков и торможений или реверсирования с добавочными маховыми массами на валу при небольшой статической нагрузке. Однако в опыте принята статическая нагрузка, так как контроль динамической нагрузки сильно затруднен. Нагрузочный ток статора подбирался опытным путем для каждого двигателя таким образом, чтобы средняя температура обмоток статора при горизонтальном положении вала составляла 120°С. Рабочая температура обмоток рольганговых двигателей серии АР по ГОСТ 10283-69 может достигать 165°С. Температура 120°С выбрана из следующих соображений:

а) для того чтобы при изменении угла наклона не было опасного превышения температуры обмоток статоров, оставлен запас 45°С;

б) поскольку коэффициент теплоотдачи зависит от температуры оболочки двигателя, температура обмоток не должна значительно отличаться от рабочей.

Измерение температуры обмотки статора проводилось по изменению сопротивления без отключения двигателя от сети.

Испытания проводились на двигателях АР 43-4, АРФ 43-4, АР 52-8, АРФ 52-8, АР 63-10, АРФ 63-10, АР 74-10. Угол наклона вала двигателя изменялся от 0 до 90° через 15°.

Ток нагрузки при всех положениях электродвигателя оставался неизменным. По изменению температуры обмотки статора при различных углах наклона рассчитан коэффициент изменения номинальной мощности $K_р$. Для сохранения теплового состояния двигателя при его установке в наклонном положении на этот коэффициент следует умножать каталожное значение мощности. Изменение $K_р$ в функции угла наклона α для спокой-

ного воздуха, принятое по средним значениям для двигателей серии АР, показано на рис. 3-1 (кривая *1*). Среднеквадратичное отклонение σ кривой *1*, рассчитанное по формуле

$$\sigma=\sqrt{\frac{\Sigma\varepsilon'^2}{n-1}}; \qquad (3\text{-}1)$$

не превосходит 1%.

Здесь ε' — разница между ординатами кривых для различных двигателей при одном α, n - число точек.

Коэффициент изменения номинальной мощности $K_р$, показанный в функции угла наклона двигателей в интервале от 0° до 90°, с достаточной степенью точности можно аппроксимировать аналитически косинусоидальной функцией

$$K_р=0{,}94+0{,}06\cos 2\alpha, \qquad (3\text{-}2)$$

показанной на рис. 3-1 (кривая *2*). Среднеквадратичное отклонение косинусоиды от средних значений не превосходит 2%.

Выбор двигателя по динамической постоянной ведется с расчетом на получение допустимого превышения температуры обмотки статора. Это подтверждается изменением динамической постоянной при изменении угла наклона двигателя от 0 до 90°: у двигателя АР 64-12 она снизилась на 12%, а у двигателя АР 43-6 на 11%. Все это подтверждает, что изменение мощности и динамической постоянной при изменении угла наклона оси вала двигателя в пределах от 0 до 90° имеет в некотором приближении одинаковый характер. Исследования показывают, что коэффициент изменения номинальной мощности $K_р$ и коэффициент изменения динамической постоянной $K_д$ можно считать одинаковыми.

При наклоне оси вала до 45° можно не производить изменение мощностей и динамических постоянных для сохранения теплового состояния обмотки статора.

3-2. ВЛИЯНИЕ РЕБЕР НА НАГРЕВ РОЛЬГАНГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АР

Актуальная задача снижения массы рольганговых двигателей в значительной степени решается повышением эффективности отвода тепла от оболочки машины в окружающую среду. Отсутствие достаточно полных и достоверных опубликованных данных по теплоотдаче электрических машин с кольцевыми ребрами на стани-

нах при естественном охлаждении послужило причиной разработки следующих вопросов:

1) тепловое излучение оболочки оребренного двигателя;

2) влияние размеров ребер станины на тепловое состояние двигателя;

3) выбор оптимальных размеров оребрения;

4) расчет нагрева оболочки.

Поставленные вопросы ввиду необычной сложности аналитических зависимостей решались на основе экспериментального исследования специально изготовленных опытных образцов, а также серийных двигателей серии АР в установившемся режиме нагрева.

У закрытых не вентилируемых двигателей наряду с естественной конвекцией тепловое излучение с поверхности оболочки играет важную роль.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется на основании закона Стефана — Больцмана

$$\alpha_л = \frac{\varepsilon C_0}{\Theta}\left[\left(\frac{\Theta_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100}\right)^4\right], \qquad (3\cdot3)$$

где Θ_1 и Θ_2 — температуры тела и окружающей среды, К; $\Theta=\Theta_1-\Theta_2$; C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела.

Степень черноты ε для окрашенной поверхности чугунного оребренного корпуса лежит в довольно широких пределах: $\varepsilon=0{,}7\div0{,}9$. Поэтому ε определялась экспериментально. На данный случай можно распространить положение теории о том, что в качестве поверхности излучения берется поверхность, «обтягивающая» корпус по вершинам ребер, и в качестве расчетной температуры можно принять среднюю температуру ребристой поверхности.

Исследование теплоотдачи излучением проводилось на двух макетах фланцевых двигателей АРФ 4-го габарита без лап, имевших 11 и 14 одинаковых кольцевых ребер на станине. Станины собирались с одними и теми же подшипниковыми щитами. При различной площади оребренной поверхности макеты имели одинаковую расчетную поверхность излучения, определяемую как поверхность цилиндра, описанного по вершинам ребер. Испытания макетов производились в барокамере при давлении $10^{-1}-10^{-3}$ Па ($10^{-3}-10^{-5}$ мм рт. ст.). Макет

Таблица 3-1

Сравнение расчетного и опытного значений тепловых потоков

Количество ребер на станине	Мощность нагревателя, Вт	Расчетная мощность излучения, Вт	Относительная погрешность, %
11	119	123	+3,5
11	225	223	—1,0
14	222	222	0,0
14	400	387	—3,0

закреплялся в центре камеры с помощью теплоизолирующей подвески. На ребрах станины устанавливалось 36 термопар: у основания ребер, по их вершинам и в середине по высоте; на одном щите помещалось 14 термопар. Температура стенок барокамеры контролировалась термопарами. Нагревание макетов осуществлялось электрическим нагревателем, устанавливаемым в середине станины по ее оси.

Сравнение теплового потока, рассеиваемого макетами в опыте и рассчитанного при коэффициенте черноты $\varepsilon=0{,}72$, приведено в табл. 3-1.

Поскольку расхождения опытной и расчетной мощностей излучения находятся в пределах, вполне допустимых для теплотехнических исследований, можно считать подтвержденным, что для рольганговых двигателей принятый способ определения поверхности излучения и усреднение температуры оребренной поверхности являются оправданными и что ε следует принимать равным 0,72.

Естественная конвекция является основным видом теплоотвода в машинах с оребренным корпусом и естественным охлаждением. Местный коэффициент теплоотдачи конвекции у исследуемой оребренной поверхности изменяется с изменением положения рассматриваемой точки.

Для практических расчетов обычно удовлетворяются определением среднего для всей поверхности коэффициента теплоотдачи конвекцией $\alpha_к$, относя его к средним температурам поверхности и среды. Для определения $\alpha_к$ при охлаждении тел в воздухе рекомендуется следующая формула:

$$\alpha_к = C\sqrt[4]{\theta}. \qquad (3\text{-}4)$$

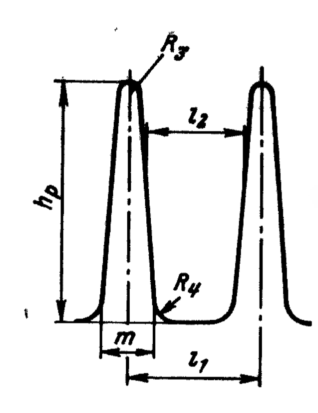


Рис. 3-2. Параметры ребер.

В условиях металлургических заводов обычны случаи, когда окружающий воздух находится в умеренном движении, возникающем от сквозняков, вентиляции, вращения роликов, движения прокатываемых изделий и т. д. Но этот вид охлаждения электродвигателей является промежуточным между естественной конвекцией и искусственной вентиляцией и поэтому в данной работе не рассматривается. Нами рассматривается наиболее тяжелый случай нефорсированного (естественного) охлаждения конвекцией.

Экспериментальное исследование охлаждения при естественной конвекции производилось на опытных образцах двигателей типа АРФ 4—6-го габаритов при различных числах и высотах ребер. Размеры ребер станин опытных образцов приведены на рис. 3-2 и в табл. 3-2. Первоначальная высота ребер на некоторых станинах делалась заведомо выше технологических возможностей серийного производства современных электромашиностроительных заводов, что позволило расширить область исследования. Уменьшение высот ребер на станине производилось путем их срезания. Для каждой высоты ребер измерялось превышение температуры обмотки статора по ее сопротивлению (дополнительно оно контролировалось заложенными в пазы термопарами) и среднее превышение температуры поверхностей станины и щитов (термопарами).

Ток статора при всех высотах ребер принимался одинаковым и таким, чтобы после последней обточки ребер температура нагрева обмотки не могла существенно превысить допустимую для изоляции класса Н.

Однотипные двигатели при полностью сточенных ребрах станин должны иметь одинаковые превышения температуры обмотки статора. Однако по ряду причин (ошибки измерения, наличие конструктивных допусков и технологических особенностей изготовления деталей) появляется разброс показателей, доходящий до 10%.

Таблица 3-2

Число и размеры ребер станин, мм

Габарит	Параметры	Число ребер						
		9	10	11	12	13	14	15
4	R_3	2	2	2,5		2,5	2,5	2,5
	m	7	7	7		7	7	7
	R_4	8,5	8,5	8,5		8,5	8,5	8,5
	$h_р$	62	57	32	—	32	32	32
	l_1	30,6	27,2	24,5		20,5	18,8	17,5
	l_2	24,6	21,2	18,5		14,5	12,8	11,5
	$h_р/m$	8,8	8,1	4,5		4,5	4,5	4,5
5	R_3		3	3	3			
	m		15	14	13			
	R_4		9	9	9			
	$h_р$	—	68,5	63,5	58,5	—	—	—
	l_1		33,6	30	27,5			
	l_2		24	20	19,5			
	$h_р\ m$		4,5	4,5	4,5			
6	R_3				3	3		
	m				12	12		
	R_4				8	8		
	$h_р$	—	—	—	74	45	—	—
	l_1				33	30		
	l_2				24,5	20,5		
	$h_р\ m$				6,1	3,8		

Для того чтобы можно было сравнивать между собой двигатели с разными числами ребер, превышение температуры обмотки и станины при полностью сточенных ребрах (максимальное превышение) принимается за 100%. Опытные значения превышений температуры при других высотах ребер берутся в соответствующем процентном отношении к максимальному превышению.

При обработке зависимости превышения температуры обмотки статора от высоты ребра возможен и другой способ совмещения максимальных превышений температуры, когда эти превышения приводятся к некоторому среднему для всех двигателей значению, и кривые $\Theta=f(h_р)$ переносятся параллельно самим себе до совпадения максимальных точек.

Обработанные с учетом обоих методов результаты сравнительных испытаний двигателей АРФ 4—6-го габаритов показаны соответственно на рис. 3-3—3-5.

Если для некоторого облегчения изготовления станины пойти на уменьшение числа ребер $N_р$, то, как видно из рис. 3-3—3-5, для сохранения нагрева на прежнем уровне необходимо значительно увеличивать высоту ребер $h_р$. Так, у двигателя АРФ 4-го габарита, имею-

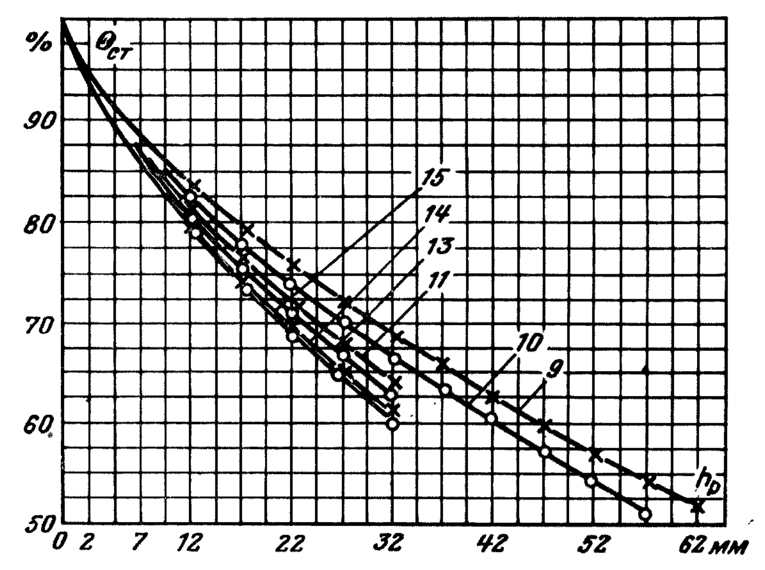
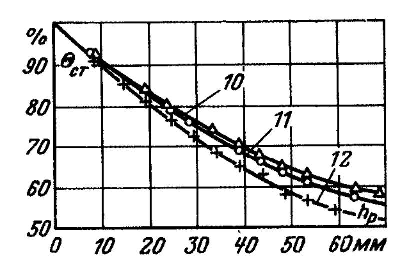


Рис. 3-3. Превышение температуры обмотки статора электродвигателя АРФ 4-го габарита в зависимости от количества ребер и их высоты.



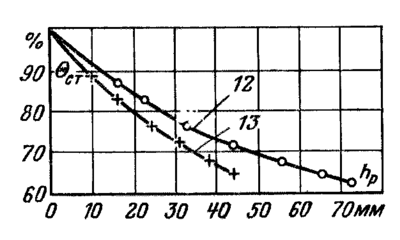


Рис. 3-4. Превышение температуры обмотки статора электродвигателей АРФ 5-го габарита в зависимости от количества ребер и их высоты.

Рис. 3-5. Превышение температуры обмотки статора электродвигателей АРФ 6-го габарита в зависимости от количества ребер и их высоты.

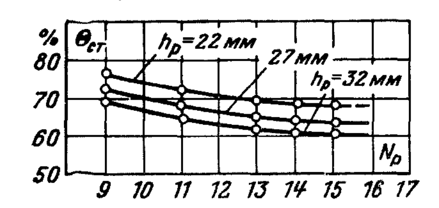


Рис. 3-6. Превышение температуры обмотки статора электродвигателей АРФ 4-го габарита в зависимости от высоты ребер.

щего в серийном исполнении $N_р$=11 и $h_р$=32 мм, неизменное превышение температуры обмотки статора при уменьшении $N_р$ до 10 и 9 получается при повышении $h_р$ соответственно до 37 и 42 мм. Аналогично для АРФ 5-го габарита при $N_р$=12, 11 и 10 высота ребер соответственно равна $h_р$=43,5; 50 и 55 мм.

Как видно из приведенных выше данных, идти на уменьшение числа ребер на станине за счет увеличения их высоты нецелесообразно из-за необоснованного увеличения расхода металла на оребрение и увеличение объема, занимаемого машиной.

Отсюда ясно, что оптимальное с точки зрения максимальной теплоотдачи число ребер больше, чем принятое у серийных станин (кривая 1, рис. 3-7).

Среднее расстояние l_2 между ребрами серийных станин приблизительно соответствует двойной ширине зоны конвективного течения. Эта двойная зона при естественной конвекции в воздухе составляет 24—25 мм. Уменьшение расстояния между ребрами приводит к снижению коэффициента теплоотдачи вследствие сужения конвективной зоны. Однако при одинаковой высоте ребер это уменьшение с запасом перекрывается увеличением поверхности охлаждения при увеличении числа ребер, но только до некоторого предела, который, соответствует оптимальному значению $N_р$.

Для определения оптимального количества ребер были изготовлены станины АРФ 4-го габарита с большим числом ребер: 13, 14 и 15. Из результатов ис-

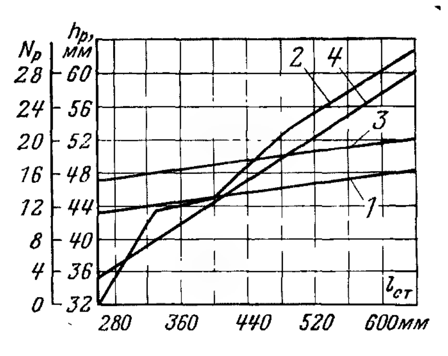


Рис. 3-7. Количество ребер и их высота в зависимости от длины станины.

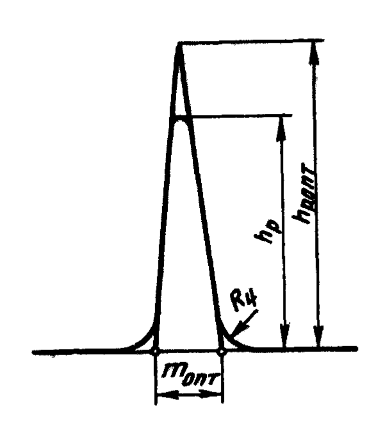


Рис. 3-8. Оптимальное треугольное ребро.

пытаний указанных опытных образцов двигателей, представленных в табл. 3-2, видно, что при увеличении числа ребер до 15 превышение температуры обмотки статора неуклонно снижается, но оптимум теплоотдачи еще не достигается. Однако ввиду наметившегося явного замедления этого снижения при увеличении числа ребер, которое проявляется одинаково при различных значениях $h_р$ (рис. 3-6), можно с уверенностью предположить, что оптимальное количество ребер, с точки зрения максимальной теплоотдачи для этого габарита, будет около 15—16. Как видно из рис. 3-6, снижение превышения температуры обмотки статора при увеличении числа ребер с 11 до 15 при одной и той же высоте ребер составляет 5%, или 8°С.

Половина расстояния между ребрами, определяющая ширину односторонней зоны естественной конвекции, в двигателях 4-го габарита с увеличенным числом ребер $N_р$ уменьшалась приблизительно до половины ширины конвективной зоны, а именно до 5—6 мм. Исходя из этих значений, может быть выбрано приемлемое количество ребер для остальных габаритов рольганговых двигателей, так как расстояние между ребрами мало зависит от диаметра станины.

На рис. 3-7 приведены рекомендуемые на основе опытов значения чисел и высот ребер для станин рольганговых двигателей (кривые *3* и *4*). Кривая *2* высота ребер серийных станин.

Вопрос об оптимальной конфигурации ребра достаточно подробно рассмотрен в литературе [Л. 7, 10, 14]. Известно, что треугольное ребро с оптимальным соотношением размеров всего лишь на 4% уступает по теплоотдаче оптимальному параболическому ребру одинаковой массы. Учитывая условия технологии литейного производства, предпочтение следует отдать ребру тре-

угольного профиля с оптимальным соотношением размеров

$$m_{\text{опт}}=1{,}67\sqrt[3]{\frac{A^2\alpha_c}{\lambda}};\tag{3-5}$$

$$h_{\text{опт}}=\frac{2A}{m_{\text{опт}}},\tag{3-6}$$

где A — площадь радиального сечения ребра; α_c — коэффициент теплоотдачи; λ — теплопроводность ребра.

Технологическое оптимальное ребро получается из оптимального треугольного (рис. 3-8).

Мощность потерь, рассеиваемых наружной поверхностью машины, имеющей ребра на станине и щитах, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$P=(S_{\text{л.ст}}\alpha_{\text{л.ст}}+S_{\text{к.ст}}\alpha_{\text{к.ст}})\,\theta_{\text{ст}}+(S_{\text{л.щ}}\alpha_{\text{л.щ}}+ \\ +S_{\text{к.щ}}\alpha_{\text{к.щ}})\,\theta_{\text{щ}}.\tag{3-7}$$

Здесь индексы «ст» и «щ» относятся соответственно к станине и щитам, а индексы «л» и «к» — к лучеиспусканию и конвекции. Кондуктивный отвод тепла на установочную плиту в проведенных опытах был практически исключен.

Коэффициент теплоотдачи излучением для станины и щитов определялся по формуле (3-3), а естественной конвекцией — по формуле (3-4), в которой коэффициент для вертикальных стенок высотой $h\leqslant 0{,}3$ м рекомендуется определять по формуле [Л. 2]

$$C=1{,}37/\sqrt[4]{h}.\tag{3-8}$$

Для высоких вертикальных стенок с $h\geqslant 0{,}3$ м, где влияние нижних лучше охлаждаемых частей почти не сказывается, рекомендуется принимать $C=1{,}78$.

Таким путем можно определять C для щитов при горизонтальной ориентации вала двигателя. Однако данный метод определения не может быть распространен на оребренные цилиндры с любой ориентацией в пространстве. Поэтому возникает необходимость разработки специального метода определения коэффициента C для поверхности станины.

Тепловой баланс (выделенные потери равны рассеянным) позволяет оценить точность определения всех

величин, входящих в выражение (3-7). Коэффициент C определяем из уравнений (3-4) и (3-7):

$$C = \frac{P - S_{\text{л ст}}\alpha_{\text{л.ст}}\Theta_{\text{ст}} - (S_{\text{л.ш}}\alpha_{\text{л.ш}} + S_{\text{к.ш}}\alpha_{\text{к.ш}})\Theta_{\text{ш}}}{S_{\text{к.ст}}\Theta_{\text{ст}}\sqrt[4]{\Theta_{\text{ст}}}}. \quad (3\text{-}9)$$

На основании анализа зависимости опытных значений коэффициента C от параметров оребрения получена следующая эмпирическая формула:

$$C = 2{,}28K_2 \Big/ \sqrt[8]{\frac{h_\text{р}}{20}}. \quad (3\text{-}10)$$

При среднем расстоянии между ребрами $10 < l_2 < 20$ мм

$$K_2 = \sqrt{\frac{20}{l_2}};$$

при $l_2 \geqslant 20$ мм $K_2 = 0{,}92$.

Среднеквадратичное отклонение опытных значений коэффициента конвективной теплоотдачи $\alpha_{\text{к.ст}}$ от рассчитанных с использованием формулы (3-10) не превосходит 5%.

Выполненные экспериментальные исследования по нагреву рольганговых двигателей серии АР дают возможность уточнить методику расчета температуры ребристых станин электрических машин с естественным охлаждением и, в частности, позволяют более обоснованно определять коэффициенты теплоотдачи $\alpha_\text{л}$ и $\alpha_\text{к}$.

Глава четвертая

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ СЕРИИ АР

4-1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс торможения электропривода наряду с пуском является неотъемлемой частью рабочего цикла. Для торможения могут быть использованы механические средства (колодочные, ленточные и другие тормоза), электрические (противотоком, динамическое) или самоторможение.

Снижение потерь в переходных режимах возможно за счет уменьшения запаса кинетической энергии системы электродвигатель — рабочая машина и выбора рационального метода торможения. Часть кинетической энергии системы приходится на долю ротора двигателя. Поэтому для подобных приводов должны применяться двигатели специальных конструктивных типов, обладающие малыми моментами инерции роторов и специальными характеристиками, обеспечивающими минимальные потери и минимальное время при пуске и торможении.

По технологическим особенностям раскатки и транспортировки металла на металлургических заводах применяются три вида торможения электродвигателей для индивидуального привода роликов рольгангов: противотоком, динамическое и самоторможение или их сочетание.

Динамическое торможение предпочтительно в тех случаях, когда необходимо выдержать определенное время торможения, заданное технологическим процессом раскатки или транспортировки металла. После окончания процесса торможения двигатель не разворачивается в обратную сторону. Кроме того, что иногда не менее важно, отказ от торможения противовключением и замена его динамическим торможением позволяют повысить число пусков в час почти в 2 раза. Это объясняется меньшим нагревом обмотки статора в режиме динамического торможения.

4-2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

При динамическом торможении обмотка статора двигателя отключается от сети переменного трехфазного тока и подключается к источнику постоянного тока, двигатель при этом работает в режиме генератора, преобразуя кинетическую энергию, запасенную во вращающихся частях, в электрическую энергию потерь в обмотке ротора.

В табл. 4-1 приведены основные схемы включения обмотки статора двигателя при динамическом торможении [Л. 1, 3, 12]. Постоянный ток, протекая по обмотке статора, создает поле, основная волна которого обра-

Таблица 4-1

Схемы включения обмотки статора асинхронных двигателей при динамическом торможении

№ схемы	Схема	Диаграмма сложения м. д. с. фаз статора	М. д. с. фаз $F_п$	$I_{экв}$	$I_п$	Сопротивление постоянному току $R_п$	Напряжение $U_п$	Мощность $P_п$
1	$I_п$; +; −	$I_п w_1$; $30°$; $F_п$; $I_п w_1$	$\sqrt{3} I_п w_1$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_п$	$1{,}22 I_{экв}$	$2r_1$	$2{,}44 I_{экв} r_1$	$3I^2_{экв} r_1$
2	$I_п$; $\frac{1}{2} I_п$; $\frac{1}{2} I_п$; +; −	$I_п w_1$; $F_п$; $\frac{1}{2} I_п w_1$; $60°$; $\frac{1}{2} I_п w_1$	$\frac{3}{2} I_п w_1$	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_п$	$1{,}41 I_{экв}$	$1\frac{1}{2} r_1$	$2{,}12 I_{экв} r_1$	$3I^2_{экв} r_1$

Продолжение табл. 4-1

№ схемы	Схема	Диаграмма сложения м. д. с. фаз статора	М. д. с. фаз $F_п$	$I_{экв}$	$I_п$	Сопротивление постоянному току R	Напряжение $U_п$	Мощность $P_п$
3	$\frac{1}{3}I_п$, $I_п$, +, $\frac{2}{3}I_п$, $\frac{1}{3}I_п$, −	$\frac{2}{3}I_п w_1$, $F_п$, $\frac{1}{3}I_п w_1$, 60°, $\frac{1}{3}I_п w_1$	$I_п w_1$	$\frac{\sqrt{2}}{3} I_п$	$2,12 I_{экв}$	$\frac{2}{3} r_1$	$1,41 I_{экв} r_1$	$3 I^2_{экв} r_1$
4	$\frac{1}{2}I_п$, $I_п$, +, $\frac{1}{2}I_п$, −	$F_п$, $\frac{1}{2}I_п w_1$, 120°, $\frac{1}{2}I_п w_1$	$\frac{\sqrt{3}}{2} I_п w_1$	$\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} I_п$	$2,45 I_{экв}$	$\frac{1}{2} r_1$	$1,22 I_{экв} r_1$	$3 I^2_{экв} r_1$
5	$I_п$, +, $I_п$, $I_п$, $I_п$, −	$I_п w_1$, $F_п$, $I_п w_1$, 60°, $I_п w_1$	$2 I_п w_1$	$\frac{2\sqrt{2}}{3} I_п$	$1,05 I_{экв}$	$3 r_1$	$3,18 I_{экв} r_1$	$3,37 I^2_{экв} r_1$

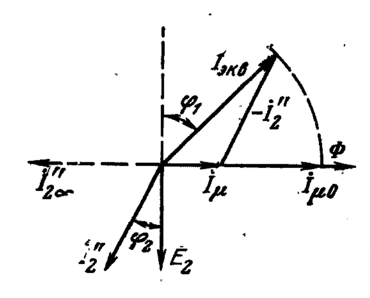


Рис. 4-1. Векторная диаграмма при динамическом торможении асинхронного двигателя.

зует систему неподвижных полюсов с синусоидальным распределением индукции.

На рис. 4-1 приведена упрощенная векторная диаграмма для основных величин, характеризующих работу двигателя в режиме динамического торможения. Вектор магнитного потока $\dot\Phi$ направлен по горизонтали вправо, а вектор э. д. с. ротора $\dot E_2$ отстает от него на 90°.

Намагничивающий ток $\dot I_\mu$ является разностью эквивалентного и вторичного приведенного токов и направлен по направлению магнитного потока. Вектор тока статора $\dot I_{экв}$ при любом значении частоты вращения остается неизменным, поэтому его конец будет перемещаться по окружности.

На основании векторной диаграммы рис. 4-1 напишем следующую зависимость между токами:

$$I^2_{экв}=I_2''^2+2I_\mu I''_2\sin\varphi_2+I^2_\mu, \qquad (4\text{-}1)$$

где

$$\sin\varphi_2=\frac{x''_2 s}{\sqrt{r_2''^2+(x''_2 s)^2}}. \qquad (4\text{-}2)$$

Ток ротора

$$I''_2=\frac{E_1 s}{\sqrt{r_2''^2+(x''_2 s)^2}}=\frac{E'_2}{\sqrt{r_2''^2+(x''_2 s)^2}}, \qquad (4\text{-}3)$$

где E_1 — э. д. с. в обмотке статора, являющаяся функцией намагничивающего тока.

Подставив значение I''_2 из (4-3) в (4-1), получим:

$$I^2_{экв}=\frac{E_2'^2}{r_2''^2+(x''_2 s)^2}+2I_\mu\frac{E'_2 x''_2 s}{r_2''^2+(x''_2 s)^2}+I^2_\mu. \qquad (4\text{-}4)$$

Первичную э. д. с. E_1 можно выразить через индуктивное сопротивление намагничивающего контура и I_μ: $E_1=x_m I_\mu$. Тогда

$$E'_2=I_\mu x_m s. \qquad (4\text{-}5)$$

Подставив выражение (4-5) в (4-4), получим:

$$I^2_{экв}=\frac{I^2_{\mu}x^2_m s^2}{r''^2_2+(x''_2 s)^2}+2\frac{I^2_{\mu}x_m x''_2 s^2}{r''^2_2+(x''_2 s)^2}+I^2_{\mu}. \qquad (4\text{-}6)$$

Отсюда

$$I_{\mu}=I_{экв}\sqrt{\frac{r''^2_2+(x''_2 s)^2}{r''^2_2+(x_m+x''_2)^2 s^2}}. \qquad (4\text{-}7)$$

Подставляя I_{μ} из (4-7) в (4-5), получаем:

$$E'_2=I_{экв}x_m\sqrt{\frac{r''^2_2+(x''_2 s)^2}{\left(\frac{r''_2}{s}\right)^2+(x_m+x''_2)^2}}. \qquad (4\text{-}8)$$

Вторичная э. д. с. E'_2 при неподвижном роторе равна нулю, с ростом скорости она увеличивается.

Выражение для тока в роторе можем найти, разделив E'_2 на полное приведенное сопротивление вторичной цепи $\sqrt{r''^2_2+(x''_2 s)^2}$,

$$I''_2=I_{экв}\sqrt{\frac{x^2_m}{(x_m+x''_2)^2+\left(\frac{r''_2}{s}\right)^2}}. \qquad (4\text{-}9)$$

Ток $I''_2=0$ при $s=0$, с увеличением скольжения I''_2 увеличивается.

При больших значениях s имеем $I''_2 \approx I_{экв}$.

Механическую характеристику при динамическом торможении можно построить с помощью общего выражения момента, Н·м:

$$M=28{,}6\frac{I''^2_2 r''_2}{n_c s}$$

или в кгс·м:

$$M=2{,}92\frac{I''^2_2 r''_2}{n_c s}. \qquad (4\text{-}10)$$

В определенном диапазоне скольжений магнитная цепь двигателя является насыщенной. Получить точное аналитическое выражение механической характеристики с учетом насыщения не представляется возможным.

В этом случае механическая характеристика строится по точкам. Из формулы (4-7) имеем:

$$s = r''_2 \sqrt{\frac{I^2_{экв} - I^2_\mu}{I^2_\mu (x_m + x''_2)^2 - I^2_{экв} x''^2_2}} \qquad (4\text{-}11)$$

Задаваясь рядом значений I_μ, определяем соответствующие значения x_m и по (4-11) вычисляем значения s.

Так как $I_{экв}$ при $s = 0$ представляет собой наибольшее значение I_μ, то значением I_μ задаемся, начиная с $I_{экв}$, затем уменьшая его.

Из (4-9) и (4-11) определяем:

$$I''_2 = \sqrt{\frac{I^2_{экв} - I^2_\mu}{1 + 2\frac{x''_2}{x_m}}}. \qquad (4\text{-}12)$$

По найденным таким образом для каждого скольжения s значения I''_2 с помощью (4-10) определяем моменты.

Когда магнитная цепь двигателя не насыщена, можно полагать, что при всех значениях скольжения индуктивное сопротивление намагничивающего контура $x_m \approx \approx U/I_\mu \approx U/I_x$.

Механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме динамического торможения имеет такое же аналитическое выражение, как и характеристика в двигательном режиме. Однако они значительно отличаются друг от друга критическими скольжениями $s_м$ и s_m.

Из сравнения $s_м = r''_2/(x_m + x''_2)$ для динамического торможения и

$$s_m = r''_2 / \sqrt{r'^2_1 + x''^2_к}$$

для двигательного режима видно, что $s_м$ при одинаковых значениях r''_2 и x''_2 будет значительно меньше s_m.

Максимальный момент $M_м$ в зависимости от постоянного тока может быть больше или меньше максимального критического момента в двигательном режиме.

Изменение статической механической характеристики динамического торможения короткозамкнутого двигателя может осуществляться только за счет изменения тока возбуждения, так как изменение сопротивления цепи ротора у изготовленного двигателя исключается.

При изменении постоянного тока в статоре двигателя с ненасыщенной магнитной цепью момент изменяется в квадратичной зависимости от тока. В насыщенной машине те же изменения тока вызывают меньшие изменения момента.

В реальных условиях магнитная цепь двигателя при работе в режиме динамического торможения с малыми скольжениями насыщена, а при больших скольжениях не насыщена, поэтому изменение постоянного тока вызывает сильные изменения момента в области больших скольжений и относительно небольшие изменения в области малых скольжений.

С ростом тока возбуждения $s_м$ несколько увеличивается в связи с увеличением насыщения магнитной цепи двигателя и уменьшением индуктивного сопротивления намагничивания.

Таким образом, расчет механических характеристик асинхронных двигателей описанным методом сводится к следующему.

Задаемся током возбуждения и по указанным выше формулам проводим расчет механической характеристики. Если она окажется неудовлетворительной, то задаемся новым значением тока возбуждения и производим расчет снова. Такой метод расчета весьма трудоемок и не дает наглядного представления об изменении характеристик при изменении тока возбуждения.

В основу другого метода расчета механических характеристик положены известные соотношения, описывающие работу асинхронного двигателя в режиме динамического торможения.

Магнитный поток двигателя при динамическом торможении сильно зависит от частоты вращения, вследствие этого расчет механических характеристик без учета насыщения может привести к недопустимым ошибкам. Для более точного расчета должна быть известна кривая намагничивания двигателя $E'_2=f(\ \ _\mu)$ или зависимость

$$x_m = f(I_\mu).$$

Расчет производим в следующем порядке:

Задаемся несколькими значениями намагничивающего тока $I_{\mu 1}$, $I_{\mu 2}$, ..., $I_{\mu n}$. Для каждого значения тока по формулам (4-1) — (4-3), (4-5) и (4-10) вычисляем I''_2, $I_{экв}$,

M при различных значениях скольжения s_1, s_2, ..., s_n. По полученным данным строим семейство вспомогательных кривых $M=f(I_{экв})$ при $s=\text{const}$ для каждого скольжения s_1, s_2, ..., s_n. С помощью этих кривых строим механическую характеристику для любого значения эквивалентного тока, так как ординаты кривых при выбранном I_μ дают тормозной момент при различных значениях скольжения.

Семейство кривых $M=f(I_{экв})$, будучи вычислено 1 раз для какого-либо двигателя, может быть в дальнейших расчетах многократно использовано.

Для удобства использования этого метода расчета следует пользоваться соотношением между током возбуждения и эквивалентным током в зависимости от схемы включения обмотки статора при динамическом торможении (табл. 4-1). В этой таблице приведены для каждой из схем сопротивления обмоток постоянному току, а также величины напряжений $U_п$ и мощности $P_п$ постоянного тока, необходимые для обеспечения заданного эквивалентного тока $I_{экв}$.

Как видно из табл. 4-1, для всех схем, кроме последней, ток $I_{экв}$ эквивалентен постоянному току не только по амплитуде м. д. с., но и по мощности электрических потерь в обмотке статора. Потери в последней схеме больше, чем во всех остальных, она является самой невыгодной, тогда как остальные схемы с точки зрения потерь являются равноценными. На практике наибольшее распространение имеет первая схема неполной звезды, как более простая.

Использование электронных вычислительных машин значительно облегчает расчет статических характеристик в режиме динамического торможения, так как решение при этом сводится к построению одного внешнего и двух внутренних циклов.

На рис. 4-2 и 4-3 для примера приведены рассчитанные на ЭВМ статические характеристики динамического торможения двигателей АР 42-8 и АР 43-6. На рис. 4-4 и 4-5 приведены статические характеристики динамического торможения этих же двигателей для двух значений постоянного тока.

В приложении 1 приведены рассчитанные указанным выше методом на ЭВМ статические механические характеристики динамического торможения для двигателей АР 4—6-го габаритов.

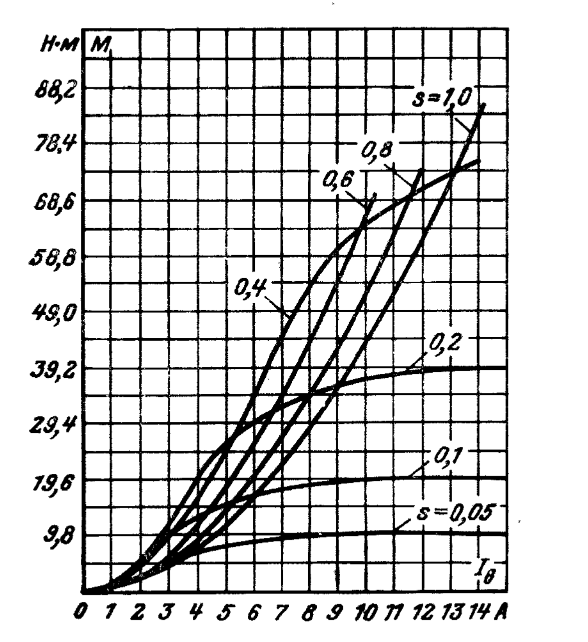


Рис. 4-2. Статические характеристики в режиме динамического торможеиия двигателя АР 42-8.

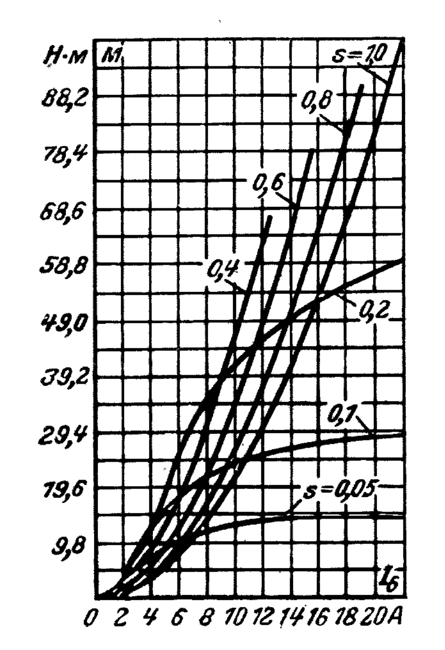
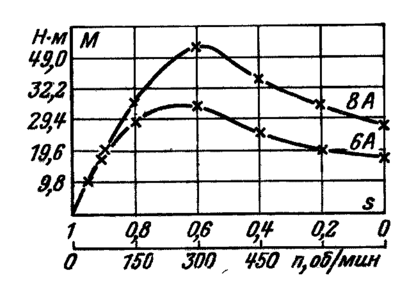


Рис. 4-3. Статические характеристики в режиме **динамического** торможения двигателя АР 43-6.



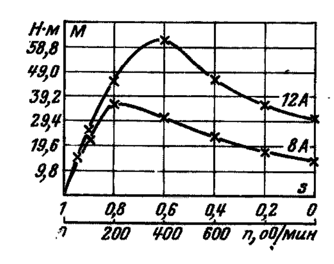


Рис. 4-4. Статические характеристики в режиме динамического торможения двигателя АР 42-8.

Рис. 4-5. Статические характеристики в режиме динамического торможения двигателя АР 43-6.

Расчет характеристик динамического торможения часто производится без учета переходных процессов, связанных с быстрым изменением скольжения двигателей. В дальнейшем механические характеристики динамического торможения, рассчитанные или снятые опытным путем по точкам при закончившихся переходных процессах, будем называть статическими (или стационарными) характеристиками динамического торможения.

4-3. ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В работах ряда авторов разработаны аналитические методы исследования переходных процессов машин переменного тока и, в частности, методы расчета процессов пуска асинхронных двигателей. Однако до сих пор не учтены особенности конструкции и эксплуатации трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, предназначенных для индивидуального привода роликов рольгангов.

Известно, что в некоторых случаях электромеханические и электромагнитные постоянные времени соизмеримы. Так как ускорение ротора оказывает воздействие на изменение во времени токов и потокосцеплений, то уравнения Кирхгофа, электромагнитного момента и движения ротора должны исследоваться совместно.

Электромеханические характеристики асинхронных двигателей, определенные с учетом переходных электромагнитных процессов, отличаются от характеристик,

снятых опытным путем или рассчитанных по точкам при закончившихся переходных электромагнитных процессах. Характеристики, определенные с учетом переходных электромагнитных процессов, будем называть динамическими (действительными) характеристиками динамического торможения в отличие от статических характеристик динамического торможения.

При очень быстром изменении частоты вращения ротора графики изменения тока и вращающего момента, соответствующие стационарным режимам работы, становятся недействительными не только из-за электромагнитных переходных процессов, но также из-за быстрого изменения частоты вращения ротора. При быстро протекающем пуске асинхронных двигателей вращающие моменты могут оказаться значительно меньше моментов, определенных в стационарном режиме. Особенно сильное снижеиие наблюдается у максимального момента. Поэтому анализ динамических характеристик асинхронных двигателей при пуске и торможении с большими ускорениями ротора следует производить с помощью дифференциальных уравнений, описывающих одновременно электромагнитные и механические переходные процессы.

В стационарном режиме каждому скольжению соответствуют строго определенные значения и фазы токов статора и ротора и вполне определенный вращающий момент. Из-за наличия в цепях роторного и статорного токов индуктивностей эти стационарные токи и вращающий момент не могут мгновенно установиться, если происходит чрезвычайно быстрое изменение скольжения, какое происходит, например, у двигателей при пуске, торможении противотоком или при динамическом торможении.

Поэтому и возникают упомянутые выше различия между динамическими и статическими характеристиками.

Одним из важных свойств динамических характеристик является то, что при одинаковом скольжении динамические вращающие моменты оказываются ниже, чем при стационарных режимах. В частности, во время разгона двигатель вообще не развивает максимальный момент статического режима. В то же время в конце процессов пуска и реверса асинхронный двигатель при внезапной нагрузке развивает за счет запасенной энер-

гии большие вращающие моменты, чем в стационарном режиме. Вращающий момент передается на вал полностью лишь в том случае, если ротор удерживается в неподвижном состоянии. В противном случае часть вращающего момента расходуется на ускорение ротора, вследствие чего нагрузке передается значительно меньший момент. Этот момент определяется в первую очередь соотношением моментов инерции ротора двигателя и внешних ускоряемых масс, соединенных с валом двигателя.

Свободными пусковыми токами создаются в основном знакопеременные (колебательные) вращающие моменты, которые накладываются на кривые динамических вращающих моментов. Благодаря этим колебательным моментам возможно кратковременное увеличение вращающего момента до весьма высоких значений. Поэтому знание колебательных моментов важно прежде всего для расчёта валов, муфт и редукторов. Однако на изменение частоты вращения и на время пуска эти моменты почти не оказывают влияния, так как их среднее значение равно нулю. В результате их воздействия на ротор асинхронного двигателя осциллограмма изменения частоты вращения имеет характерную ступенчатую форму, которая заметна только в начале пуска. Эти переходные процессы не влияют на уменьшение вращающего момента во время пуска.

В [Л. 18] сделана попытка установить критерий P, с помощью которого предлагается оценивать скорость изменения скольжения при пуске.

$$P = \frac{4g\omega^3{}_1 \Sigma J r''{}_2 s_m}{m p^2 U^3{}_{1\text{н}} I_{1\text{н}}}, \qquad (4\text{-}13)$$

где $U_{1\text{н}}$ и $I_{1\text{н}}$ — номинальное напряжение и номинальный ток статора; ΣJ — момент инерции, кг·м².

При $P<2{,}5$ скорость изменения скольжения считается быстрой. При этом электромеханические и электромагнитные постоянные времени соизмеримы и поэтому динамические механические характеристики отличаются от статических. Прежде чем приступить к определению механических характеристик асинхронного двигателя, **необходимо** определить значение критерия P для этого двигателя. Если $P<2{,}5$, имеет смысл рассчитывать характеристики, решая дифференциальные уравнения на электронных вычислительных машинах или непосредст-

Таблица 4-2

Значения критерия P для двигателей серии АР

Тип двигателя	P	$\Sigma J_п$	$K_{к.п}$	Тип двигателя	P	$\Sigma J_п$	$K_{к.п}$
42-4	1,700	0,257	20,3	52-12	0,143	6,27	119
43-4	0,785	0,563	35,7	53-12	0,097	15,6	196
42-6	0,745	0,590	46,5	63-10	0,286	16,2	43,0
43-6	0,426	1,04	66,0	64-10	0,244	26,3	52,5
43-6*	1,885	—	—	63-12	0,218	21,5	57,4
42-8	0,505	0,875	68,6	64-12	0,163	39,3	78,6
43-8	0,344	1,28	81,6	63-16	0,090	51,2	137
42-10	0,368	1,20	94,5	64-16	0,077	82,7	165,5
43-10	0,226	1,95	124	73-10	0,144	57,0	71,2
42-12	0,277	1,62	128	74-10	0,108	97,0	92,3
43-12	0,155	2,85	181	73-12	0,121	70,2	81,6
52-8	0,328	2,75	52,2	74-12	0,066	111,8	106
53-8	0,142	6,33	79,0	73-16	0,068	121,0	151
52-10	0,173	5,15	98,0	74-16	0,050	205,5	196
53-10	0,089	10,0	125				

* $K_к = 50$

венно снимать их экспериментально в действительных условиях пуска, реверса или торможения.

Если $P \geqslant 2,5$, то переходные электромагнитные процессы заканчиваются значительно быстрее, чем начнет изменяться скорость двигателя. В этом случае динамические механические характеристики практически не отличаются от статических, и решение дифференциальных уравнений нецелесообразно, так как механические характеристики гораздо легче определить из уравнений статического режима, например по схеме замещения и круговой диаграмме.

В табл. 4-2 приведены рассчитанные по формуле (4-13) значения критерия P для двигателей серии АР. Значение s_m при определении P принято усредненным для двигателей всей серии АР и равным 0,8, а значения ΣJ приведены в табл. 4-4.

Из табл. 4-2 видно, что для двигателей серии АР критерий P значительно меньше 2,5. При расчете критерия P значения суммарных моментов инерции ΣJ принимались как наиболее часто встречающиеся в практике работ металлургических заводов. Эти же значения суммарных моментов инерции приняты и при опытном определении механических характеристик динамическо-

го торможения. Приведенные значения P подтверждают необходимость определения действительных механических характеристик рольганговых двигателей серии АР при пуске, торможении противовключением и динамическом торможении.

Кроме того, в табл. 4-2 приведено максимальное (предельное, критическое) значение суммарного момента инерции $\Sigma J_п$, при котором скорость изменения скольжения считается не быстрой. Определение $\Sigma J_п$ произведено по формуле (4-13) из условия, что $P=2,5$. В этой же таблице показано значение коэффициента $K_{к.п}$, определяемого как отношение максимального момента инерции $\Sigma J_п$ к моменту инерции ротора, т. е.

$$K_{к.п}=\Sigma J_п/J_{рот}. \qquad (4\text{-}14)$$

Величина $K_{к.п}$ дает минимальное значение кратности суммарного момента инерции системы рольганг — двигатель к моменту инерции ротора двигателя, при котором процесс изменения скольжения считается не быстрым, и поэтому определение механических характеристик в режимах пуска и торможения следует производить по уравнениям статического режима.

В тех случаях, когда отношение действительного суммарного момента инерции системы рольганг — двигатель $K_к$ меньше $K_{к.п}$, которое назовем критическим по аналогии с критическим суммарным моментом инерции, следует учитывать влияние переходных электромагнитных процессов на характеристики процессов пуска и торможения.

В практике металлургических заводов коэффициент $K_к=\Sigma J/J_{рот}$ обычно ниже 30 и лишь в крайне редких случаях доходит до 50. Коэффициент $K_{к.п}$ (табл. 4-2) для двигателей серии АР больше 50 и лишь у двух двигателей находится в пределах 30—50. Однако у всех двигателей серии АР $K_{к.п}>30$. Это подтверждает необходимость учета переходных электромагнитных процессов при определении действительных характеристик изменения момента двигателей всей серии АР при пуске, торможении противотоком и динамическом торможении.

Расчет динамических пусковых характеристик и динамических механических характеристик в режиме динамического торможения хотя и возможен, но связан с большими трудностями. Когда исследовалось большое количество типоразмеров двигателей серии АР, для

каждого типоразмера необходимо было получить механические характеристики в режиме динамического торможения для 4—5 значений токов возбуждения. Их легче и быстрее можно получить экспериментально, путем непосредственной записи кривых. Поэтому действительные механические характеристики двигателей серии АР в режиме динамического торможения были получены опытным путем.

4-4. СРАВНЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ СО СТАТИЧЕСКИМИ. АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В приложении 2 приведены таблицы изменения момента динамического торможения в функции частоты вращения для 28 типов двигателей серии АР. Максимальные значения токов при динамическом торможении для ограничения динамических усилий в лобовых частях обмотки и одностороннего магнитного притяжения между статором и ротором ограничивались значениями, близкими к токам короткого замыкания двигателей при номинальном напряжении. Минимальные значения токов принимались близкими к номинальным токам двигателей. Остальные значения токов равномерно распределены между этими двумя крайними значениями.

Кратность $K_к = \Sigma J / J_{рот}$ во время записи моментов при динамическом торможении приблизительно принималась:

$K_к = 10$ для АР 4-го габарита; $K_к = 5$ для АР 6-го габарита;
$K_к = 5$ для АР 5-го габарита; $K_к = 4$ для АР 7-го габарита.

Экспериментально подтверждено, что по окончании переходных процессов характеристика тормозного момента, снятая начиная с меньшей частоты вращения ротора, накладывается на характеристику, для получения которой торможение было начато с более высокой частоты вращения. Имеется в виду в этом случае, что суммарный момент инерции и ток динамического торможения остаются одинаковыми. Максимальный момент динамического торможения и критическое скольжение не зависят от частоты вращения в момент начала торможения.

Для одного и того же двигателя с увеличением тока динамического торможения критическое скольжение

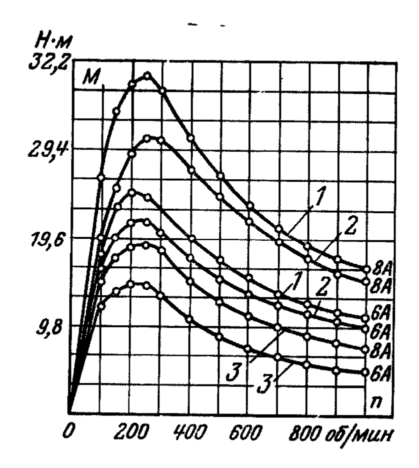


Рис. 4-6. Механические характеристики в режиме динамического торможения двигателя АР 43-6.
1 — статический режим; 2 — $K_к = 50$; 3 — $K_к = 11,3$.

растет. Это объясняется тем, что при увеличении тока динамического торможения увеличивается насыщение, а индуктивное сопротивление и намагничивающий ток падают.

Из анализа экспериментальных кривых следует также, что критическое скольжение $s_м$ не зависит от суммарного момента инерции, а форма кривой $M=f(n)$ и, следовательно, максимальный и средний тормозные моменты при определенном токе зависят от суммарного момента инерции привода и ротора (ΣJ).

Кривые моментов в режиме динамического торможения для различных суммарных моментов инерции привода лежат в области между статической кривой, рассчитанной или снятой по точкам при закончившихся электромагнитных процессах, и кривой, снятой без добавочных моментов инерции. Чем больше ΣJ, тем больше максимальный и средний тормозные моменты двигателя, тем ближе кривая момента в режиме динамического торможения приближается к статической кривой.

Для иллюстрации сказанного на рис. 4-6 приведены механические характеристики в режиме динамического торможения двигателя АР 43-6, снятые для различных моментов инерции и двух значений токов. Рассмотрение кривых подтверждает, что максимальные и средние тормозные моменты зависят от моментов инерции, связанных с валом двигателя при торможении. Средний тормозной момент определяется как средняя величина момента по площади прямоугольника, равновеликого площади между кривой $M=f(n)$ и осью абсцисс.

В табл. 4-3 приведены расчетные значения электромеханических постоянных времени B двигателей серии АР для одного суммарного момента инерции и для двух значений среднего тормозного момента. Суммарный мо-

Таблица 4-3

Значения электромеханических и электромагнитных постоянных времени электродвигателей серии АР

Тип двигателя АР	$s_н$	ΣJ	$M_{ср.д1}$	B_1	$M_{ср.д2}$	B_2	T_a	T_b	Ток торможения	
									$I_{п1}$	$I_{п2}$
		кг·м²	Н·м	с	Н·м	с	с	с	А	А
42-4	0,10	0,177	22,6	0,125	18,1	0,161	0,149	0,003	9	7
43-4	0,10	0,177	39,2	0,071	26,0	0,106	0,172	0,003	15	11
42-6	0,10	0,177	19,6	0,095	15,65	0,120	0,079	0,003	9	7
43-6	0,10	0,177	19,6	0,093	11,75	0,154	0,095	0,003	12	6
43-6	0,10	0,783	41,2	0,200	21,55	0,376	0,095	0,003	8	6
42-8	0,12	0,177	20,6	0,081	13,7	0,120	0,049	0,002	8	6
43-8	0,12	0,177	36,3	0,046	24,5	0,068	0,059	0,002	10	8
42-10	0,12	0,177	19,6	0,067	11,75	0,110	0,032	0,002	6	4
43-10	0,12	0,177	21,55	0,064	14,7	0,087	0,035	0,002	8	6
42-12	0,10	0,177	17,65	0,053	10,8	0,086	0,022	0,002	6	4
43-12	0,10	0,177	22,6	0,040	17,65	0,053	0,027	0,002	8	6
52-8	0,13	0,36	83,3	0,045	54,8	0,069	0,098	0,003	15	11
53-8	0,13	0,36	98,1	0,039	65,7	0,057	0,120	0,003	23	18
52-10	0,12	0,36	69,6	0,039	46,1	0,059	0,064	0,003	15	11
53-10	0,13	0,36	107	0,028	78,5	0,038	0,079	0,003	22	18

Продолжение табл. 4.3

Тип двигателя АР	$s_н$	ΣJ	$M_{ср.д1}$	B_1	$M_{ср.д2}$	B_2	T_a	T_b	Ток торможения	
									$I_{п1}$	$I_{п2}$
		кг·м²	Н·м	с	Н·м	с	с	с	А	А
52-12	0,14	0,36	55,8	0,046	31,4	0,084	0,039	0,003	13	9
53-12	0,14	0,36	100	0,026	80,4	0,033	0,048	0,003	21	17
63-10	0,13	1,85	117,5	0,130	68,7	0,224	0,107	0,002	25	19
64-10	0,12	2,58	225	0,082	154	0,118	0,123	0,003	32	26
63-12	0,12	1,85	117,5	0,099	83,5	0,139	0,073	0,002	22	18
64-12	0,12	2,58	147	0,110	125,5	0,129	0,075	0,002	31	26
63-16	0,13	1,85	122,5	0,079	89,3	0,108	0,040	0,002	22	18
64-16	0,13	2,58	196	0,067	166,5	0,078	0,049	0,002	31	26
73-10	0,13	3,3	510	0,054	343	0,080	0,157	0,003	55	45
74-10	0,13	4,2	735	0,048	627	0,056	0,167	0,003	75	65
73-12	0,07	3,3	452	0,027	321	0,038	0,109	0,003	50	40
74-12	0,07	4,2	471	0,033	392	0,039	0,108	0,003	65	56
73-16	0,12	3,3	271	0,057	191	0,081	0,057	0,003	40	32
74-16	0,12	4,2	607	0,032	441	0,044	0,065	0,003	60	50

$$B = \frac{n_c s_н \Sigma J}{9{,}55 M_{ср.д}},$$

где $s_н$ — номинальное скольжение; $M_{ср.д}$ — средний тормозной момент, Н·м; ΣJ — момент инерции, кг·м².

мент инерции, приведенный в табл. 4-3, соответствует значению, принятому при экспериментальном снятии механических характеристик динамического торможения. Средние тормозные моменты заимствованы из опытных характеристик динамического торможения.

В табл. 4-3 показаны и расчетные значения постоянных времени для затухающих электромагнитных процессов двигателей серии АР. Постоянная времени T_a для медленно затухающих электромагнитных процессов рассчитана по формуле $T_a = x_m(r'_1 + r''_2)/\omega_1 r'_1 r''_2$, постоянная времени T_b для быстро затухающих электромагнитных процессов по формуле $T_b = (x'_1 + x''_2)/\omega_1(r'_1 + r''_2)$ [Л. 4]. Значения активных и индуктивных сопротивлений приведены в табл. 6-2.

Как видно из табл. 4-3, значения постоянной времени T_b для быстро затухающих электромагнитных процессов двигателей всей серии АР составляют 0,002—0,003 с, что значительно меньше значений электромеханических постоянных времени B. Поэтому быстро затухающие электромагнитные процессы с постоянной времени T_b не могут оказать заметного влияния на электромагнитные характеристики двигателей.

Из табл. 4-3 видно, что постоянные времени T_a для медленно затухающих электромагнитных процессов и постоянные времени B_1 и B_2 для электромеханических процессов соизмеримы. При этих условиях переходные электромагнитные процессы существенно изменяют статические механические характеристики двигателя.

Проверка достоверности механических характеристик в режиме динамического торможения произведена путем сравнения времени торможения, определенного расчетом и экспериментальным осциллографированием. Исходные данные для расчета и осциллографирования — суммарный момент инерции при торможении и средний тормозной момент, полученный при определенном токе, были одинаковыми.

Расчетное время торможения определялось по формуле

$$t = \frac{n\Sigma J}{9{,}55 M_{ср.д}}. \qquad (4\text{-}15)$$

Опытное время торможения определялось из осциллограмм.

В связи с тем что действительные механические характеристики всех двигателей серии АР были определены по одной и той же методике, проверка произведена на трех двигателях АР 43-4, АР 52-10 и АР 52-12, взятых из выпуска.

1. АР 43-4. $M_{ср.д} = 45{,}7$ Н·м; $I_п = 15$ А. Расчет времени торможения дает: $t_р = 1490 \cdot 0{,}178/9{,}55 \cdot 45{,}7 = 0{,}607$ с. Время торможения из осциллограмм равно $t_0 = 0{,}60$ с. Разница составляет 1,1%.

2. АР 43-4. $M_{ср.д}=26$ Н·м; $I_п=11$ А. Расчетное время торможения равно: $t_р=1490 \cdot 0{,}178/9{,}55 \cdot 26=1{,}07$ с. Из осциллограммы получаем: $t_0=1{,}11$ с. Разница составляет 3,6%.

3. АР 52-10. $M_{ср.д}=69{,}6$ Н·м; $I_п=15$ А. Расчетное время торможения равно: $t_р=595 \cdot 0{,}303/9{,}55 \cdot 69{,}6=0{,}272$ с. Из осциллограммы имеем: $t_0=0{,}26$ с. Разница составляет 4,6%.

4. АР 52-10. $M_{ср.д}=46{,}1$ Н·м; $I_п=11$ А. $t_р=595 \cdot 0{,}303/9{,}55 \times 46{,}1=0{,}41$ с. Из осциллограммы получаем: $t_0=0{,}38$ с. Разница составляет 7,9%.

5. АР 52-12. $M_{ср.д}=31{,}4$ Н·м; $I_п=9$ А. $t_р=495 \cdot 0{,}303/9{,}55 \times 31{,}4=0{,}502$ с. Из осциллограммы $t_0=0{,}49$ с. Разница составляет 2,4%. Средняя разница между расчетом и опытом по пяти проверкам составляет 2,5%, что следует считать вполне допустимым.

Таким образом, косвенная опытная проверка по времени торможения подтверждает правильность методики снятия механических характеристик опытным путем.

При выборе асинхронных рольганговых двигателей необходимо учитывать реальные моменты инерции привода и реальные токи динамического торможения, допускаемые для конкретных электродвигателей.

При обработке и анализе опытных и расчетных данных определено относительное уменьшение моментов динамических механических характеристик по сравнению со статическими для двигателей серии АР (рис. 4-7). Значения токов торможения приведены в табл. 4-3.

Относительное уменьшение тормозного момента динамических характеристик по сравнению со статическими определено по формуле

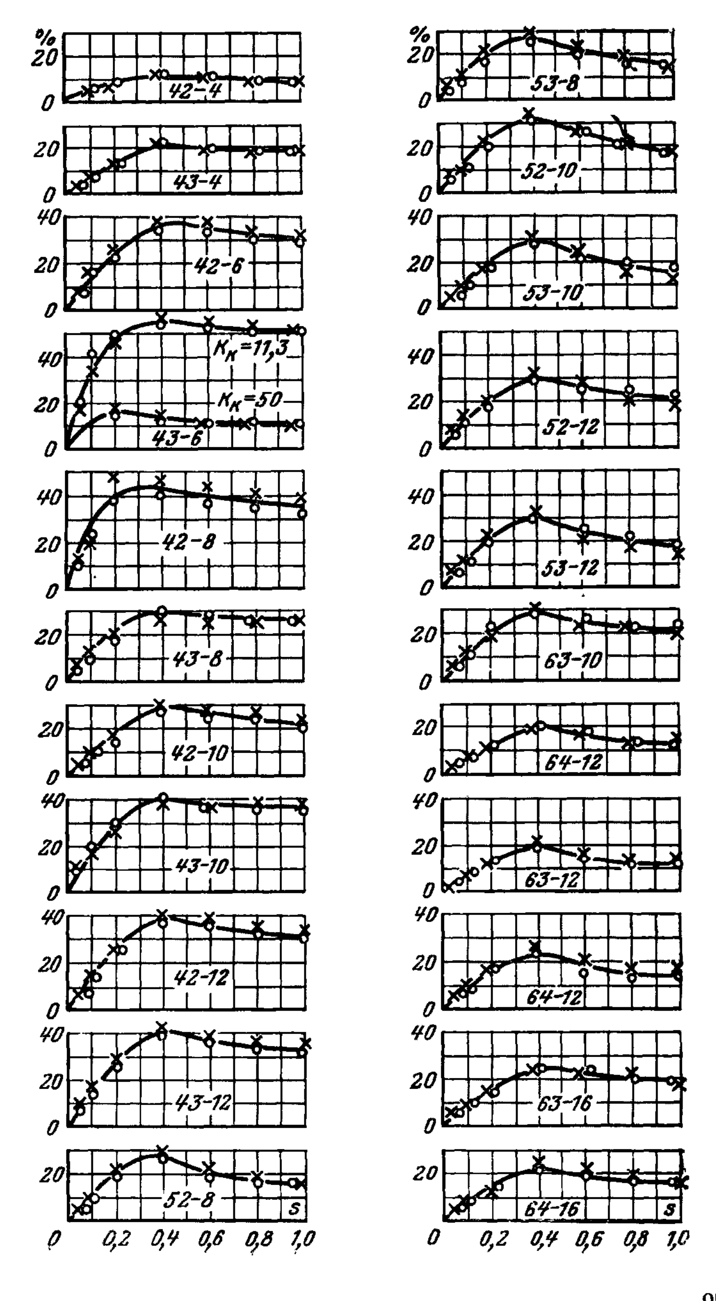
$$\Delta M = 100\left(1 - \frac{h_д}{h_с}\right), \%, \qquad (4\text{-}16)$$

где $h_д$ и $h_с$ — ординаты тормозного момента по динамической и статической характеристикам при данном токе торможения и одинаковой частоте вращения.

Из рис. 4-7 видно, что относительное уменьшение момента в режиме динамического торможения не зависит от тока торможения, а зависит от суммарного момента инерции, так как относительные уменьшения тормозного момента для большего и меньшего значений токов торможения совпадают. При высокой кратности момента инерции ($K_к=50$) уменьшение среднего тормозного момента по сравнению со статической харак-

Рис. 4-7. Относительное уменьшение моментов на динамических характеристиках по сравнению со статическими для двигателей серии АР.

о и × — соответственно для меньших и бо́льших токов торможения.



%
20
0
42-4
43-4
40
42-6
K_K=11,3
K_K=50
43-6
42-8
43-8
42-10
43-10
42-12
43-12
52-8
s
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
53-8
52-10
53-10
52-12
53-12
63-10
64-12
63-12
64-12
63-16
64-16

теристикой двигателя АР 43-6 для токов торможения 8 и 6 А составляет примерно 10%, а при $K_к=11,3$ для тех же токов достигает 50%.

Серия электродвигателей АР спроектирована с широким диапазоном частот вращения (от 1500 до 300 об/мин при 50 Гц), имеет твердую шкалу начальных пусковых моментов и максимальную унификацию узлов и деталей. Поэтому влияние суммарного момента инерции привода двигателя на характеристики динамического торможения для разных типов машин различно. Различие особенно резко выражено у 4-го габарита, где в одном и том же пакете статора предусмотрена укладка обмотки на $2p=4$, 6, 8, 10, 12 полюсов. Конечно, такая унификация очень желательна для производства, но от этого характеристики двигателей не получаются оптимальными.

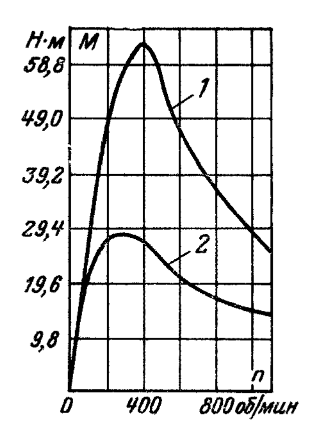
Итак, в результате анализа экспериментальных данных установлено, что отклонение (уменьшение) моментов на динамических механических характеристиках по сравнению со статическими не зависит от тока торможения. Если определить действительные механические характеристики динамического торможения для нескольких токов торможения, то относительное уменьшение действительного тормозного момента для любого тока торможения по сравнению со статическим режимом для того же тока торможения постоянно. Эту закономерность можно выразить следующими соотношениями:

$$\Delta M=\text{const} \text{ при } \Sigma J=\text{const}, \quad I_п=\text{var}. \qquad (4\text{-}17)$$

В то же время

$$\Delta M=f(\Sigma J). \qquad (4\text{-}18)$$

Практическое значение этих закономерностей велико. Ясно, что действительные механические характеристики при динамическом торможении определить гораздо труднее, чем статические. Предположим, что статические механические характеристики двигателя рассчитаны для нескольких значений тормозного тока и определены (рассчитаны или сняты опытным путем) для этого же двигателя действительные характеристики для одного какого-либо тока торможения, но с различными моментами инерции. Определив относительное уменьшение вращающих моментов в динамических характеристиках по сравнению со статическими при различных моментах



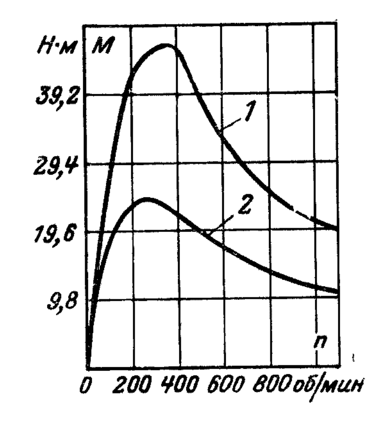


Рис. 4-8. Механические характеристики динамического торможения электродвигателя АР 43-6 для тормозного тока 12 А.
1 — статическая характеристика; 2 — динамическая характеристика при $K_к=11,3$.

Рис. 4-9. Статическая (1) и динамическая (2) механические характеристики электродвигателя АР 43-6 для тормозного тока 10 А при $K_к=11,3$.

инерции для этого тока торможения, найдем действительные средние тормозные моменты для других токов торможения. Для этого соответствующие значения вращающих моментов статической характеристики для данного тормозного тока надо уменьшить в зависимости от момента инерции. Это позволяет быстро определить пригодность характеристики для заданного технологического времени торможения и установить требуемый тормозной ток. Следовательно, определение семейства динамических механических характеристик режима динамического торможения значительно облегчается.

Незначительное отличие относительного изменения динамической характеристики двигателя от среднего значения для двух токов торможения объясняется погрешностями построения графиков при обработке осциллограмм динамического торможения и перфокарт программы расчета статических характеристик на ЭВМ.

Установленная зависимость уменьшения динамического момента по сравнению со статическим от суммарного момента инерции распространяется также на пуск и торможение двигателя противотоком ввиду аналогичности физических явлений, лежащих в основе этих процессов.

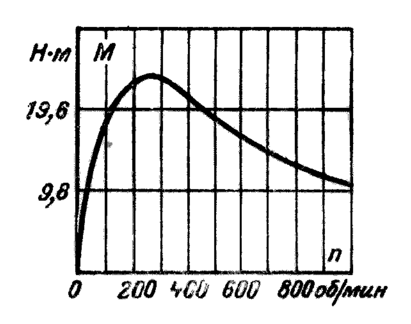


Рис. 4-10. Опытная механическая характеристика электродвигателя АР 43-6 для тормозного тока 10 А при $K_к=11{,}3$.

Ниже приведен пример получения действительной характеристики динамического торможения для двигателей типа АР 43-6 при суммарном момента инерции $\Sigma J=0{,}178$ кг·м², т. е. $K_к=11{,}3$.

На рис. 4-8 даны статическая и динамическая характеристики для тормозного тока 12 А. Относительное уменьшение динамического тормозного момента ΔM по сравнению со статическим режимом, рассчитанное по формуле (4-16), показано на рис. 4-7 для двигателя АР 43-6 (кривая $K_к=11{,}3$). Преобразовав формулу (4-16), получим:

$$h_д=h_с(1-\Delta M). \qquad (4\text{-}19)$$

Пользуясь формулой (4-19), графиком ΔM для $K_к=11{,}3$ (рис. 4-4) и статической характеристикой для тока 10 А, получаем динамическую характеристику для тормозного тока 10 А при $K_к=11{,}3$ (рис. 4-9, кривая *2*).

На рис. 4-10 показана действительная механическая характеристика динамического торможения для тока 10 А, полученная опытным путем.

Из сравнения динамических механических характеристик рис. 4-9 и 4-10 для тока торможения 10 А и $K_к=11{,}3$ видно, что они практически совпадают.

Глава пятая

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДА РОЛИКОВ РОЛЬГАНГОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ[1]

На металлургических заводах трехфазные асинхронные рольганговые двигатели с короткозамкнутым ротором серии АР (ГОСТ 10283-69) относятся к основному оборудованию прокатных станов и применяются для привода одиночных роликов различных рольгангов.

[1] Написана совместно с Н. П. Чинеповым.

По технологии прокатного производства часто требуется более низкая частота вращения роликов, чем номинальная частота вращения обычных серийных электродвигателей. Это достигается несколькими путями: применением редукторов, преобразователей частоты или тихоходных (многополюсных) электродвигателей при частоте сети 50 Гц.

Использование постоянного тока нами не рассматривается, так как этот вопрос требует самостоятельных исследований.

Вопрос выбора экономически наиболее эффективного типа привода с учетом полных затрат на производство и эксплуатацию приобретает большую актуальность. Принимая во внимание сложившуюся практику, а также ближайшую перспективу, представляется целесообразным исследование экономической эффективности и сферы применения следующих типов приводов:

а) редукторного привода с электродвигателями на частоту 50 Гц;

б) привода с частотными преобразователями и электродвигателями промышленной и пониженной частоты;

в) привода с одновременным использованием редукторов и частотных преобразователей;

г) привода с многополюсными тихоходными электродвигателями на частоту 50 Гц и прямой передачей (электродвигатель — ролик).

Для сбора исходных данных было обследовано 37 прокатных станов ведущих отечественных металлургических заводов и получены необходимые материалы головных проектных организаций. В результате обследования выяснилось, что действующая система учета и отчетности недостаточно дифференцирована по затратам на различные виды оборудования. Это потребовало разработки специальных методов расчета.

Технико-экономические расчеты выполнены для рольгангов блюмингов, рельсобалочных станов, сортопрокатных, листопрокатных и трубопрокатных станов, станов гнутых профилей и по материалам нескольких термоотделений ряда металлургических заводов и комбинатов (Магнитогорский, Нижне-Тагильский, Челябинские трубный и металлургический, Череповецкий, Коммунарский, «Запорожсталь» и др.).

Состав затрат при рассмотрении вариантов приводов, ввиду сложности выявления исходных данных, опре-

делялся только теми составляющими, которые непосредственно и решающим образом влияют на экономическую эффективность. В соответствии с этим учитывались капитальные затраты на рабочие машины, здания и сооружения. На том же основании в качестве эксплуатационных расходов учитывались отчисления на амортизацию, затраты на текущий ремонт, содержание основных средств и потери электроэнергии.

Капиталовложения исчислялись по отчетным данным заводов или действующим прейскурантам (в ценах 1967 г.), а составляющие эксплуатационных расходов находились следующим образом.

Отчисления на амортизацию определялись от сумм капиталовложений с применением фактического процента отчислений по данному направлению затрат согласно заводским калькуляциям или по установленным нормам отчислений. Затраты на текущий ремонт и содержание основных средств определялись методом процентирования капитальных вложений в размерах фактического соотношения этих составляющих за отчетный год. Затраты на потери электроэнергии рассчитывались по номинальному режиму работы электрооборудования.

Большие трудности вызвал учет затрат на систему смазки, влияние которой весьма велико, так как редукторные передачи требуют консистентной и жидкой смазки, а безредукторные передачи — только консистентной. Это особенно усложнилось тем, что затраты на смазку в системе действующего учета отдельно не выделялись из общих затрат на оборудование. Поэтому необходимые технико-экономические показатели определялись по данным эксплуатации и проектным материалам (принятые расчетные данные показаны в табл. 5-1).

Делалось это так. Капитальные вложения принимались по материалам проектных организаций, в которых подыскивались нужные или близкие к ним объекты, а эксплуатационные расходы брались по отчетной документации заводов, на которых эти объекты находятся в эксплуатации. Затем вычислялись удельные капиталовложения и эксплуатационные затраты на одну точку смазки (табл. 5-2) и общие затраты в зависимости от числа точек смазки учитываемого оборудования. Состав затрат предусматривался аналогичным тому, который был указан выше для привода.

Таблица 5-1

Расчетные данные по системам смазки прокатных станов[1]

Наименование	Маслопроводы и арматура		Подвалы			Количество точек смазки, шт.	Система смазки в целом	
	Масса, т	Стоимость, тыс. руб.	Масса оборудования, т	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Количество смазочных станций		Масса, т	Стоимость, тыс. руб.
Крупносортный стан 950-800:								
система консистентной смазки	60	53	64	53,6	19	4666	124	106,6
система жидкой смазки	142	126	95	79,6	5	1250	237	205,6
Среднесортный стан 350:								
система консистентной смазки	100	140,8	34	48,7	7	5684	134	189,2
система жидкой смазки	169	237,9	52	72,6	2	876	221	311,0
Мелкосортный стан 250:								
система консистентной смазки	80	78,8	114	113,9	25	6000	194	192,7
система жидкой смазки	190	186,7	170	171,0	4	900	360	357,7
Блюминг 1300:								
система консистентной смазки	19	16,8	38	33,3	5	1035	57	50,1
система жидкой смазки	22	19,4	57	50,2	1	128	79	69,6
Толстолистовой стан 2800:								
система консистентной смазки	14	—	—	—	14	5430	178	135,2
система жидкой смазки	—	—	—	—	12	1840	417	433,9

[1] Таблица составлена на основании работ Гипромеза и Укргипромеза, 1970.

Таблица 5-2

Удельные показатели стоимости по системе жидкой смазки

Наименование станов	Капиталовложения на одну точку смазки, руб.	Эксплуатационные расходы на одну точку смазки, руб.
Крупносортный стан 950-800	236,3	32
Среднесортный стан 350	484,4	46,5
Мелкосортный стан 250	552,4	68
Блюминг 1300	762,5	139,8
Толстолистовой стан 2800	341,8	41,3
Тонколистовой стан	472,2	62
Трубоэлектросварочный стан 530-820	303,6	31,4

Отметим некоторые наиболее существенные особенности и допущения в принятой методике расчета.

Для получения непромышленной частоты в соответствующих вариантах привода выбран один тип машинной преобразовательной установки[1]. Объясняется это тем, что стоимость подобных преобразователей для широкого диапазона частот и мощностей колеблется в относительно небольших размерах (8,5—10 тыс. руб.), а абсолютная их стоимость несколько выше, чем преобразователей на тиристорах, и, следовательно, в оценку попадает наименее благоприятный случай. Мощность и потери электроэнергии, которые вводились в расчеты, пересчитывались в зависимости от уровня фактически необходимой частоты. Резервная мощность преобразователей выбиралась на основании опыта проектирования. Коэффициент спроса потребителей принимался по данным эксплуатации. Выбор электродвигателей производился из условий полной взаимозаменяемости существующих электродвигателей и вновь предусматриваемых по конкурирующим вариантам. Строительная часть, связанная с размещением оборудования, учитывалась в размерах, позволяющих обеспечить нормальные условия монтажа, эксплуатации и ремонтов. За базовый вариант, как правило, принимался вариант существующего привода. Годовой фонд рабочего времени усред-

[1] Преобразовательный агрегат переменного тока состоит из синхронного генератора типа СГЧ 313-46-4 на 220 В, 20 Гц, 160 кВт, 600 об/мин; синхронного электродвигателя типа СД 12-29-10 на 380 В, 240 кВт, 600 об/мин, 50 Гц и комплекта пускорегулирующей аппаратуры.

Таблица 5-3

Группы и стоимость редукторов

Наименование	Группа, кг	Стоимость одного редуктора, руб.
Редукторы роликов рольгангов цилиндрические, двухступенчатые	50—100	92
То же	100—250	187
То же	250—500	325
Редукторы роликов рольгангов цилиндрические одноступенчатые	50—100	65
То же	100—120	92

Примечание. Цены по прейскуранту № 19-01. Прейскурантгиз, М., 1969.

нялся. Проведенная работа распространялась только на те объекты, которые имеют электродвигатели серии АР.

С учетом вышеизложенного выполнено сравнение вариантов редукторных и безредукторных приводов промышленной и непромышленной частоты.

Вопрос о возможности использования тихоходных электродвигателей на частоте 50 Гц с прямой передачей вследствие ограниченности по диапазону параметров выпущенной партии и отсутствию достаточно полных эксплуатационных данных решался с точки зрения наиболее вероятной перспективы. Для этого вариант с редукторной передачей принимался за исходный, и для него определялись затраты, которые относятся на механическую часть привода, связанную с применением редукторов (табл. 5-3). Эта часть затрат в варианте с тихоходными двигателями отсутствует и поэтому выступает в качестве некоторой экономии капиталовложений. На данную экономию рассчитывалось возможное увеличение массы каждого электродвигателя в варианте с тихоходными машинами, поскольку они требуют большего расхода материалов. Допустимость такого расчета определяется относительно большой устойчивостью удельной стоимости одного килограмма массы (0,9—1 руб/кг) большинства рольганговых серийных электродвигателей.

Исходя из таких предпосылок, определялись капитальные вложения в целом по варианту с тихоходными электродвигателями, а затем все составляющие эксплуатационных расходов, кроме затрат на потери электро-

энергии, определялись на общих основаниях. Они находились по удельным усредненным номинальным потерям на один килограмм массы машины.

Полученные показатели позволили методом последовательного приближения установить такую единичную массу двигателя, при которой приведенные затраты варианта с тихоходными электродвигателями были бы не выше наименьших из тех, которые получены для конкурирующих вариантов. Таким образом, прежде всего необходимо установить возможность выполнения электродвигателей, которые, удовлетворяя всем техническим требованиям конкретного задания, имели бы массу, не превосходящую максимально допустимую по условию минимума приведенных затрат.

Анализ вариантов с одновременным использованием редукторов и частотных преобразователей установил, что замещающие их аналоги практически невозможны в настоящее время, и поэтому сравнительные оценки в подобных случаях не выполнялись. Объясняется это следующим. Указанные варианты в условиях производства вызываются необходимостью очень глубокого снижения скорости вращения роликов рольгангов.

При применении для этой цели только редукторов требуется многоступенчатая передача, что невыгодно экономически из-за резкого удорожания привода, сложно в исполнении и монтаже. Применение с той же целью только преобразовательных установок вообще исключается, так как для получения нужной скорости приводных электродвигателей необходима весьма низкая частота (3—5 Гц), которую нельзя получить на серийных электромашинных преобразователях. Кроме того, начальный пусковой момент серийных электродвигателей (на номинальные частоты как 50, так и 20 Гц) резко снизится и может оказаться недостаточным для требуемой нагрузки. Для этого случая следует дополнительно рассмотреть вариант с тиристорным преобразователем и со специальными электродвигателями, рассчитанными для работы на частотах от 1 до 15 Гц с номинальной частотой 5 Гц. Сейчас таких электродвигателей в серии АР нет. Возможно, что оптимальным вариантом окажется привод постоянного тока.

Наиболее характерные результаты сравнения различных вариантов привода даны в табл. 5-4. Анализ этих результатов показал безусловную экономическую

Таблица 5-4

Экономическое сравнение эффективности вариантов привода роликов рольгангов

Объект	Замещаемый вариант					Вариант с тихоходными электродвигателями			Приведенные затраты, тыс. руб.		Вариант с тихоходными электродвигателями (III)			Рекомендуемый тип привода
	Редукторный													
	Тип электродвигателя[1]	Количество электродвигателей (числитель, шт.) масса одного электродвигателя (знаменатель), кг	Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы годовые (знаменатель), тыс. руб.	Высвобождаемые вложения при переходе на тихоходные электродвигатели, тыс. руб.	С частотным преобразователем. Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы (знаменатель), тыс. руб.	Увеличение массы электродвигателя за счет высвобожденных вложений, кг	Наибольшая допустимая масса электродвигателя по условию минимума приведенных затрат, кг	Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы (знаменатель), тыс. руб.	Редукторный вариант (I)	Вариант с частотными преобразователями (II)	Приведенные затраты, тыс. руб.	Число полюсов машины $2p$ (минимум)	Техническая выполнимость электродвигателя	
Листопрокатный стан 2800 Череповецкого металлургического завода	АРП 73-10	472/355	505,2/80,8	318	332,7/49,9	1029	610	294,1/58,8	182,0	114,0	113,6	90	Невыполнимо	II
То же Коммунарского металлургического завода	АРП 73-10	1602/355	1375,7/293	889,4	816,6/197,9	910	435	712/218,2	568,1	361,2	360,6	90	То же	II
То же Нижне-Тагильского металлургического комбината	АРП 73-10	710/355	676,2/103,3	423	419,1/64,7	951	525	380,9/71,7	238,5	148,5	147,9	90	. .	II
Рельсобалочный стан 800 Нижне-Тагильского металлургического комбината	АРФ 52-6	250/135	139,4/24	106,3	139,1/25,2	560	500	128/26,7	51,9	53,0	51,3	44	. .	I—II

Объект	Замешаемый вариант					Вариант с тихоходными электродвигателями			Приведенные затраты, тыс. руб.		Вариант с тихоходными электродвигателями (III)			Рекомендуемый тип привода
	Редукторный													
	Тип электродвигателя[1]	Количество электродвигателей (числитель, шт.) масса одного электродвигателя (знаменатель, кг)	Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы годовые (знаменатель), тыс. руб.	Высвобождаемые вложения при переходе на тихоходные электродвигатели, тыс. руб.	С частотным преобразователем. Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы (знаменатель), тыс. руб.	Увеличение массы электродвигателя за счет высвобожденных вложений, кг	Наибольшая допустимая масса электродвигателя по условию минимума приведенных затрат, кг	Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы (знаменатель), тыс. руб.	Редукторный вариант (I)	Вариант с частотными преобразователями (II)	Приведенные затраты, тыс. руб.	Число полюсов машины $2p$ (минимум)	Техническая выполнимость электродвигателя	
Отделочное отделение Нижне-Тагильского металлургического комбината	АРП 53-10	50/150	30,8/4,6	22,4	24,7/4,2	598	480	24,6/5,1	10,8	9,1	9,1	30	Выполнимо, но в серии двигателей АР такого типа нет[2]	II
Крупносортный стан 650 Нижне-Тагильского металлургического комбината	АРП 53-10	308/150	154,3/29,4	101,8	178,3/37	481	460	145,1/30,2	60,3	72,6	59,2	40	Невыполнимо	I
Листопрокатные станы 2300/1700 Челябинского металлургического завода	АР 53-12	188/150	155,7/20,4	126,5	105,9/14,5	823	480	92,1/16,1	51,5	35,7	34,5	80	То же	II
Сортопрокатный стан 300-2 Челябинского металлургического завода	АРП 53-12	179/150	167,2/26,5	136,7	106,9/21,5	914	540	99/23,1	59,9	42,9	42,9	48	» »	II

Объект	Замещаемый вариант					Вариант с тихоходными электродвигателями			Приведенные затраты, тыс. руб.		Вариант с тихоходными электродвигателями (III)			
	Редукторный													
	Тип электродвигателя[1]	Количество электродвигателей (числитель, шт.) масса одного электродвигателя (знаменатель, кг)	Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы годовые (знаменатель), тыс. руб.	Высвобождаемые вложения при переходе на тихоходные электродвигатели, тыс. руб.	С частотным преобразователем. Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы (знаменатель), тыс. руб.	Увеличение массы электродвигателя за счет высвобожденных вложений, кг	Наибольшая допустимая масса электродвигателя по условию минимума приведенных затрат, кг	Полные вложения (числитель) и эксплуатационные расходы (знаменатель), тыс. руб.	Редукторный вариант (I)	Вариант с частотными преобразователями (II)	Приведенные затраты, тыс. руб.	Число полюсов машины $2p$ (минимум)	Техническая выполнимость электродвигателя	Рекомендуемый тип привода
Тонколистовой стан 1450 Магнитогорского комбината	АРФ 53-4	100/70	75,6/12,7	66,2	59,7/15,7	579	530	54,2/15,8	**27,8**	27,6	26,6	16	Выполнимо (электродвигатель АРФ 73-16)	III
Трубоэлектросварочный стан 530-820 Челябинского трубопрокатного завода	АРП 43-10	114/70	68/7,7	56,4	70,8/12,4	424	424	49,5/8,5	21,3	26,6	18,4	42	Невыполнимо	I
То же 1220 Челябинского трубопрокатного завода	АРП 43-10	755/70	450,6/59,6	373,8	375,4/70,5	424	424	328/57,7	149,3	145,6	123,3	40	То же	I—II

[1] В настоящее время двигатели типа АРП заменены на тип АРК.

[2] С учетом затрат на проектирование и освоение производства вариант двигателя с $2p = 30$ становится невыгодным.

эффективность привода с частотными преобразователями почти для всех рассмотренных случаев. При этом для получения низких частот вращения роликов вариант электродвигателей с номинальной частотой 20 Гц и преобразователями частоты имеет явное преимущество перед электродвигателями на промышленную частоту как с редукторами, так и с преобразователями. Наибольший экономический эффект получился при рабочей частоте в пределах 10 Гц с тенденцией дальнейшего роста при увеличении числа роликов.

Расчеты показали, что привод с частотными преобразователями экономически целесообразен для электродвигателей до 7-го габарита вследствие быстрого роста стоимости и резкого увеличения массы последующего габарита электродвигателей. Преимущество этого варианта сохраняется, пока повышение стоимости электродвигателя не выйдет за пределы примерно 180—200 руб.

Область применения редукторного привода с редукторами малой массы (80—100 кг) может расшириться, так как конкурирующий вариант обычно имеет опережающий рост затрат за счет более мощных электродвигателей, необходимых по условию получения тождественного энергетического и технологического эффектов.

Экономический эффект от использования редукторного привода снижается, главным образом, от капитальных затрат на систему жидкой смазки. Существенно отметить малое влияние исполнения электродвигателей на экономическую эффективность приводов с частотными преобразователями, а также режима их работы, ПВ и фонда рабочего времени.

Расчеты, проведенные для вариантов с тихоходными электродвигателями, позволяют сделать вывод о том, что переход к указанной схеме всегда целесообразен, если замещаемый вариант имеет электродвигатели не выше 6-го габарита. Это следует из того, что резерв по массе, необходимый для снижения частоты вращения электродвигателей до 7-го габарита получился весьма значительным (330—440 кг). Не исключается, что в отдельных случаях экономически будет выгодна замена приводов и с электродвигателями 7-го габарита, поскольку резерв массы и в этом случае доходит почти до 260 кг.

Необходимо отметить, что указанное выше справедливо только в том случае, если замещающие электро-

двигатели предусмотрены номенклатурой серийного производства. При проектировании и освоении производства нового типа электродвигателя значительные дополнительные затраты, как правило, оказываются соизмеримыми или превосходят уровень экономического эффекта от применения схемы прямой передачи на промышленной частоте. В настоящей работе приведены результаты исследования сравнения экономической эффективности различных вариантов привода для роликов рольгангов на металлургических заводах с рабочей частотой не ниже 10 Гц.

Поскольку подобные вопросы в технической литературе освещены чрезвычайно слабо, результаты приведенного анализа можно положить в основу последующих исследований, связанных с определением оптимального варианта привода роликов рольгангов.

Глава шестая

МЕТОДИКА ВЫБОРА РОЛЬГАНГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АР ДЛЯ ЗАДАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

6-1. ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемой методике даны формулы для проверки правильности выбора рольганговых электродвигателей серии АР для различных режимов работы.

Рольганговые двигатели с короткозамкнутым ротором серии АР предназначены как для повторно-кратковременных режимов работы с большим числом циклов в час, так и для работы в длительном режиме с установившейся скоростью. Во многих случаях работа двигателей происходит по сложному графику.

Пригодность двигателей для длительного режима работы с необходимой установившейся частотой вращения проверяется по частоте вращения, допустимой мощности, начальному пусковому моменту (для учета редких пусков или реверсов под нагрузкой).

Если двигатель предназначается для работы по несложному графику с большим числом циклов в час (пуск, торможение, реверс) при небольшой статической нагрузке, то пригодность двигателей проверяется, главным образом, по частоте вращения, начальному пусковому моменту и динамической постоянной для заданной частоты сети f и продолжительности включения ПВ.

Проверка допустимой частоты включений тем необходимее, чем больше приведенный к валу двигателя момент инерции нагрузки и чем больше частота включений.

Из рассмотрения характеристик рольганговых двигателей можно заметить, что для повторно-кратковременных режимов работы с большим числом циклов в час наиболее удовлетворительные характеристики имеют многополюсные двигатели ($2p>8$). Для этих двигателей ток холостого хода примерно равен току статора при номинальной мощности. Дополнительный нагрев в этом случае происходит в основном за счет потерь в роторе.

Для длительных режимов работы с установившейся скоростью наиболее целесообразными являются высокоскоростные двигатели ($2p<8$).

Для режимов работы по сложным графикам двигатели рекомендуется проверять как по допустимой мощности, начальному пусковому моменту и динамической постоянной, так и по средним эквивалентным потерям. Требуется, конечно, согласование частот вращения. Электродвигатели для привода рабочих и транспортных рольгангов должны проверяться на максимально допустимый момент при проскальзывании ролика под раскатом и минимально необходимый момент при пробуксовке.

Все данные, которые могут понадобиться при расчетах, приведены в виде таблиц и графиков для двигателей серии АР в диапазоне частот от 10 до 85 Гц и продолжительности включения от ПВ=15% до ПВ=100%.

Характеристики двигателей составлены в основном по расчетным данным для статического режима работы при пропорциональном изменении напряжения в зависимости от изменения частоты.

Потери в стали, механические потери и коэффициенты теплоотдачи приведены как средние опытные значения.

Активные сопротивления фаз обмоток статоров и приведенные сопротивления короткозамкнутых клеток роторов даны для горячего состояния электродвигателей при некоторой усредненной температуре обмотки статора.

$$r_{1гор} = 1{,}40 r_{1хол15°C}.$$

Сопротивление обмотки статора и ротора при других температурах определяется по известной формуле:

$$r_t = r(1+at),$$

где для обмотки статора из медного провода $a = 0{,}004°C^{-1}$; для обмотки ротора из алюминиево-магниевого сплава $a = 0{,}0023°C^{-1}$.

Динамические постоянные электродвигателей рассчитывались с учетом их теплового состояния; расчет этих констант из механических соображений (по степени разгона) рекомендуется производить по формуле (2-30).

Следует иметь в виду, что коэффициенты $C_п$, $C_т$ и $C_д$ для пуска, торможения противотоком и для динамического торможения приведены для статических характеристик.

Рекомендуемые методы выбора рольганговых двигателей и проверки их пригодности для требуемых режимов работы применяются после того, как определен режим работы электродвигателя: число циклов в час, способы торможения, статические моменты нагрузки, моменты инерции механизма и нагрузки, приведенные к валу двигателя, продолжительность включения, частота сети, скорость вращения и т. д. В конце главы даны примеры проверки рольганговых электродвигателей для заданных режимов работы по предлагаемой методике.

Как уже упоминалось в гл. 1, в практических расчетах наряду с системой СИ используются и прежние единицы измерения. Приводим соответствующие формулы расчета или коэффициенты пересчета:

$$Д = 4KZ\alpha_р\Sigma J,$$

где $Д$ — динамическая постоянная, кг·м²·ч⁻¹; ΣJ — суммарный момент инерции; K — коэффициент торможения.

$$Д' = KZ\alpha_р\Sigma GD^2,$$

где $Д'$ — динамическая постоянная, кгс·м²·ч⁻¹; ΣGD^2 — суммарный маховый момент, кгс·м².

Так как численные значения J, выраженные в кг·м², и значения GD^2, выраженные в кгс·м², отличаются в 4 раза $\left[J(\text{кг}\cdot\text{м}^2) = \frac{GD^2}{4}(\text{кгс}\cdot\text{м}^2)\right]$, то численные значения $Д$ и $Д'$ также отличаются в 4 раза $\left[Д(\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}) = \frac{Д'}{4}(\text{кгс}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1})\right]$.

6-2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Наименование механизма, для которого выбирается электродвигатель.

2. Частота сети f, Гц.

3. Линейное напряжение при соединении фаз обмотки статора звездой U, В.

Характеристики двигателей приведены из условия пропорционального изменения напряжения в зависимости от частоты, т. е.

$$U_f = 380f/50.$$

4. Максимальное число циклов в час — пусков и торможений или реверсов.

5. Способ торможения: противотоком, динамическое торможение или самоторможением.

Примечание к п. 4 и 5.

Если повторно-кратковременный режим работы двигателя происходит по сложному графику и применяются торможения разного рода, то необходимо знать:

число пусков в час Z_1;

число динамических торможений в час Z_2;

число торможений противотоком в час Z_3;

число самоторможений в час Z_4.

6. Суммарный момент инерции механизма и раската, приведенный к валу двигателя:

при пуске $J_{1мех}$, кг·м²;

при динамическом торможении $J_{2мех}$, кг·м²;

при торможении противотоком $J_{3мех}$, кг·м².

Обычно эти три момента считаются одинаковыми.

7. Средний статический момент нагрузки $M_с$, Н·м.

8. Время работы с установившейся частотой вращения в течение каждого цикла t_v, с, или относительная продолжительность включения ПВ, %.

9. Температура окружающего воздуха вблизи электродвигателя $t_{окр}$, °С.

При необходимости задаются максимальный момент при проскальзывании и минимальный момент при пробуксовке.

10. Тип двигателя серии АР, подлежащий проверке для заданного режима работы.

Все вышеуказанные данные выдаются заказчиком.

11. Начальный пусковой момент двигателя при соответствующей частоте f (частота) $M_{кf}$, Н·м.

Таблица 6.1

Некоторые параметры двигателей серии АР

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	$J_{рот}$ АР, АРФ	$J_{рот}$ АРК	$S_{охл}$	α*	$I_{в.макс}$	Потери в стали $P_с$	$P_{мех}$
	кг·м²	кг·м²	м²	Вт/(м²·°С)	А	Вт	Вт
42-4	0,01275	0,01500	0,1177	47	9	62	30
43-4	0,01575	0,01900	0,1405	43	15	88	30
42-6	0,01275	0,01500	0,1177	45	9	82	15
43-6	0,01575	0,01900	0,1405	40	12	84	15
42-8	0,01275	0,01500	0,1177	41	8	57	10
43-8	0,01575	0,01900	0,1405	39	10	66	10
42-10	0,01275	0,01500	0,1177	39	6	69	8
43-10	0,01575	0,01900	0,1405	36	8	86	8
42-12	0,01275	0,01500	0,1177	36	6	70	7
43-12	0,01575	0,01900	0,1405	34	8	94	7
52-6	0,0525	0,0700	0,2023	45	17	94	35
53-6	0,0800	0,0900	0,2483	40	30	132	35
52-8	0,0525	0,0700	0,2023	44	15	93	25
53-8	0,0800	0,0900	0,2483	39	23	126	25
52-10	0,0525	0,0700	0,2023	41	15	105	20
53-10	0,0800	0,0900	0,2483	36	22	147	20
52-12	0,0525	0,0700	0,2023	38	15	120	17
53-12	0,0800	0,0900	0,2483	33	21	179	17
63-8	0,375	0,395	0,3065	41	30	172	100
64-8	0,500	0,525	0,3530	37	37	247	100
63-10	0,375	0,395	0,3065	38	25	183	60
64-10	0,500	0,525	0,3530	34	32	239	60
63-12	0,375	0,395	0,3065	36	22	217	35
64-12	0,500	0,525	0,3530	32	31	265	35
63-16	0,375	0,395	0,3065	35	22	350	20
64-16	0,500	0,525	0,3530	31	31	450	20
73-10	0,800	0,850	0,427	40	55	280	70
74-10	1,050	1,100	0,502	37	75	390	70
73-12	0,800	0,850	0,427	38	50	300	60
74-12	1,050	1,100	0,502	35	65	420	60
73-16	0,800	0,850	0,427	36	40	360	35
74-16	1,050	1,100	0,502	33	60	440	35
83-10	1,925	—	0,612	38	—	300	70
84-10	2,550	—	0,730	36	—	360	70
83-12	1,925	—	0,612	37	—	360	60
84-12	2,550	—	0,730	34	—	380	60
83-16	1,925	—	0,612	36	—	380	40
84-16	2,550	—	0,730	33	—	450	40
83-20	1,925	—	0,612	34	—	470	40
84-20	2,550	—	0,730	31	—	570	40

* Среднее опытное значение.

Таблица 6-2

Основные расчетные параметры двигателей серии АР 380 В, 50 Гц

Тип двигателя	r^*_1	r'^*_2	x_1	x'_2	σ	r'_1	r''_2	x'_1	x''_2	$x''_к$	x_m	$D_к$	$I_х$	$I_{к1}$	$\cos\varphi_х^{**}$	$\cos\varphi_к^{**}$	$P_{2т}$	$P_{2п}$
	Ом	Ом	Ом	Ом	—	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	А	А	А	—	—	кВт	кВт
42-4	6,10	15,43	7,18	10,12	1,035	6,32	16,50	7,45	10,83	18,28	200	12,00	1,1	8,4	0,158	0,74	1,2	1,2
43-4	3,80	10,38	4,82	6,96	1,034	3,93	11,08	4,98	7,43	12,41	147	17,70	1,5	12,4	0,146	0,71	1,7	1,7
42-6	7,15	18,20	8,25	12,55	1,066	7,62	20,62	8,79	14,25	23,04	129	9,55	1,7	7,2	0,139	0,72	0,9	0,9
43-6	4,33	13,45	6,09	9,35	1,062	4,60	15,15	6,47	10,40	16,87	100	13,05	2,2	10,1	0,110	0,69	1,3	1,3
42-8	11,23	21,10	11,09	11,49	1,100	12,35	25,53	12,20	13,90	26,10	116	8,43	1,9	6,1	0,151	0,80	0,7	0,7
43-8	7,96	17,93	9,36	10,02	1,098	8,75	21,50	10,35	12,24	22,59	105	9,75	2,1	7,1	0,136	0,76	0,9	0,9
42-10	13,80	26,20	14,15	14,70	1,170	16,15	35,90	16,55	20,10	36,65	96	6,00	2,3	5,2	0,199	0,76	0,5	0,5
43-10	9,45	20,20	10,58	11,20	1,170	11,05	27,64	12,37	15,35	27,72	71	7,94	3,1	6,9	0,183	0,75	0,65	0,7
42-12	17,10	33,25	16,40	18,50	1,240	21,20	41,20	20,30	22,90	43,20	60	5,10	2,7	4,4	0,247	0,72	0,3	0,35
43-12	9,90	26,20	13,40	14,45	1,235	12,20	39,95	16,55	22,00	38,55	65	5,71	3,4	5,8	0,204	0,67	0,45	0,55
52-6	3,26	7,51	5,16	4,00	1,054	3,44	8,34	5,44	4,45	9,89	96	22,3	2,3	15,8	0,116	0,76	2,2	2,2
53-6	1,76	4,81	3,26	2,58	1,050	1,85	5,28	3,42	2,74	6,16	65	35,7	3,4	26,0	0,102	0,71	3,3	3,5
52-8	3,85	11,00	6,55	5,96	1,078	4,15	12,75	7,06	6,92	13,98	88	15,75	2,5	11,9	0,115	0,70	1,6	1,6
53-8	1,87	6,84	4,08	3,70	1,075	2,01	7,90	4,40	4,27	8,67	55	25,7	4,0	19,5	0,091	0,76	2,5	2,6
52-10	3,66	10,91	7,16	5,93	1,130	4,13	13,93	8,09	7,57	15,66	60	14,05	3,7	12,0	0,112	0,68	1,5	1,5
53-10	2,06	7,70	5,00	4,16	1,127	2,32	9,46	5,63	5,10	10,73	43	20,5	5,1	17,5	0,097	0,67	2,1	2,3
52-12	4,45	12,65	7,56	6,85	1,175	5,23	17,45	8,89	9,45	18,34	50	11,98	4,4	11,0	0,136	0,60	1,1	1,2
53-12	2,38	7,95	4,66	4,27	1,175	2,56	10,90	5,01	5,90	10,91	30	20,0	7,3	17,5	0,121	0,66	1,5	1,9
63-8	1,60	4,50	2,94	1,82	1,054	1,68	4,99	3,11	2,02	5,13	56	43,0	3,9	26,5	0,132	0,76	3,3	3,7
64-8	1,16	3,38	2,21	1,36	1,050	1,22	3,72	2,32	1,50	3,82	43	57,5	5,1	35,0	0,131	0,76	4,0	4,4
63-10	1,71	5,25	3,32	2,09	1,070	1,83	6,02	3,55	2,39	5,94	44	37,0	5,0	23,5	0,110	0,72	3,0	3,3
64-10	1,16	3,98	2,34	1,58	1,070	1,24	4,57	2,51	1,81	4,32	34	51,0	6,4	32,0	0,103	0,73	3,8	4,2
63-12	1,97	5,96	3,51	2,35	1,100	2,17	7,21	3,86	2,84	6,70	36	33,0	6,2	21,7	0,116	0,70	2,2	2,5
64-12	1,32	4,22	3,08	1,66	1,100	1,45	5,10	3,39	2,01	5,40	26	40,7	8,5	31,0	0,103	0,72	3,0	3,7
63-16	2,09	7,13	2,63	3,07	1,126	2,35	9,05	2,97	3,89	6,86	25	32,1	9,0	20,0	0,155	0,64	1,4	2,2
64-16	1,60	5,55	2,07	2,18	1,179	1,89	7,72	2,34	3,03	5,37	18	41,0	12,0	26,0	0,146	0,64	1,7	2,7
73-10	0,72	2,61	1,81	1,15	1,064	0,77	2,96	1,93	1,30	3,23	29	68,2	7,4	48,0	0,096	0,71	5,5	6,0
74-10	0,53	1,90	1,55	1,22	1,070	0,57	2,17	1,66	1,41	3,07	23	71,7	9,4	65,5	0,097	0,70	7,3	8,0
73-12	0,89	2,81	1,91	1,96	1,095	0,97	3,37	2,09	2,35	4,44	22	49,6	9,8	39,5	0,096	0,68	5,0	5,5
74-12	0,60	2,17	1,46	1,51	1,092	0,66	2,59	1,60	1,80	3,40	17,5	64,7	12,6	57,5	0,093	0,72	6,0	6,5
73-16	1,06	3,56	2,44	2,50	1,188	1,26	5,02	2,90	3,52	6,42	15,5	34,3	14,2	35,1	0,110	0,65	3,8	4,0
74-16	0,66	2,68	1,64	2,23	1,100	0,73	3,25	1,80	2,70	4,50	11,5	49,0	18,0	51,0	0,094	0,63	4,8	5,5

* В горячем состоянии ($r_{гор} = 1{,}4 r_{1\ 15°C}$).

** Средние опытные значения.

Таблица 6-3

Начальный пусковой ток статора $I_{к1}$

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	При частоте, Гц						
	10	20	30	40	60	70	85
42-4	2,4	4,2	6,1	7,4	9,2	9,8	10,5
43-4	3,5	6,3	8,8	11,9	13,5	14,4	15,3
42-6	2,3	3,8	5,3	6,4	7,8	8,3	8,8
43-6	3,4	5,6	7,5	9,0	10,9	11,5	12,1
42-8	1,8	3,1	4,4	5,3	6,6	7,1	7,5
43-8	2,4	3,9	5,3	6,3	7,8	8,3	8,8
42-10	2,7	3,0	3,8	4,7	5,6	6,0	6,4
43-10	3,4	4,1	5,1	6,2	7,5	8,1	8,5
42-12	2,9	3,0	3,5	4,0	4,8	5,1	5,3
43-12	4,1	4,2	5,0	5,8	6,9	7,3	7,7
52-6	4,7	8,4	11,8	14,2	17,5	18,6	19,8
53-6	7,6	13,7	19,0	23,0	28,2	29,8	31,7
52-8	3,7	6,3	8,6	10,3	13,6	13,7	14,5
53-8	6,4	10,7	14,5	17,3	20,9	22,2	23,5
52-10	4,6	6,7	9,0	10,8	13,0	13,7	14,5
53-10	6,6	10,0	13,3	15,8	18,9	19,9	21,0
52-12	5,2	6,4	8,4	9,9	11,8	12,4	12,8
53-12	8,2	10,6	13,4	15,6	18,6	19,5	20,4
63-8	7,9	13,6	19,7	23,5	28,7	30,1	32,0
64-8	10,6	19,0	25,7	31,2	38,0	40,0	42,1
63-10	7,6	13,1	16,7	21,0	25,1	26,5	27,9
64-10	10,6	18,0	24,0	28,6	34,3	36,0	38,1
63-12	8,0	12,3	16,4	19,4	23,3	24,7	25,6
64-12	11,2	17,6	23,6	27,8	33,4	35,2	37,0
63-16	11,3	13,4	16,5	19,0	22,0	23,0	24,0
64-16	14,0	16,8	20,8	23,7	27,8	29,0	30,0
73-10	16,3	27,8	35,4	43,4	51,1	53,3	56,7
74-10	20,8	36,0	47,5	55,8	65,5	68,1	71,1
73-12	13,8	23,7	30,5	35,4	42,3	44,0	45,9
74-12	20,0	33,0	43,0	52,0	60,0	62,5	65,0
73-16	15,7	22,2	27,8	32,1	37,2	38,8	40,3
74-16	23,9	32,6	40,7	46,7	54,3	56,5	57,5

12. Синхронная частота вращения двигателя при заданной частоте $n_{cf}=60f/p$, об/мин, где p — число пар полюсов.

13. Момент инерции ротора двигателя (табл. 6-1) $J_{рот}$, кг·м^2.

14. Активное сопротивление фазы обмотки статора двигателя в горячем состоянии (табл. 6-2) r_1, Ом.

15. Активное сопротивление клетки ротора в горячем состоянии, приведенное к обмотке статора (табл. 6-2), r''_2, Ом.

16. Начальный пусковой ток статора при заданной частоте (табл. 6-3) $I_{к1f}$, А.

Таблица 6-4

Приведенный начальный пусковой ток ротора $I''_{к2}$

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	При частоте, Гц							
	10	20	30	40	50	60	70	85
42-4	2,0	3,8	5,4	6,6	7,6	8,3	8,8	9,4
43-4	2,9	5,6	8,0	11,0	11,4	12,5	13,2	14,2
42-6	1,6	3,0	4,4	5,5	6,0	6,5	6,9	7,3
43-6	2,4	4,5	6,3	7,5	8,5	9,2	9,8	10,3
42-8	1,2	2,3	3,4	4,1	4,8	5,2	5,6	6,0
43-8	1,5	3,0	4,1	5,1	5,8	6,4	6,8	7,2
42-10	0,8	1,7	2,5	3,2	3,5	3,9	4,1	4,4
43-10	1,2	2,4	3,3	4,2	4,7	5,2	5,6	6,0
42-12	0,7	1,4	2,0	2,4	2,7	2,9	3,2	3,4
43-12	0,9	1,8	2,5	3,0	3,5	3,9	4,1	4,3
52-6	3,9	7,3	10,3	12,5	14,4	15,5	16,5	17,6
53-6	6,3	12,2	17,3	20,9	23,5	25,7	27,4	29,0
52-8	2,7	5,1	7,2	8,7	10,1	10,9	11,7	12,4
53-8	4,6	8,7	12,1	14,5	16,7	17,8	18,9	20,1
52-10	2,6	4,7	6,8	8,4	9,4	10,3	10,8	11,5
53-10	3,7	7,0	10,0	12,2	13,6	14,7	15,6	16,5
52-12	2,2	3,9	5,6	6,7	7,7	8,3	8,9	9,4
53-12	3,5	6,6	9,0	10,7	12,4	13,2	14,0	14,7
63-8	6,5	12,5	17,4	20,9	23,5	25,3	27,0	28,3
64-8	9,2	17,5	24,0	29,4	32,0	35,8	37,8	39,8
63-10	5,9	10,7	17,8	17,7	20,0	21,5	22,7	23,8
64-10	7,9	15,0	20,2	24,4	27,4	29,6	31,1	32,9
63-12	4,9	9,2	12,7	15,3	17,2	18,6	19,6	20,6
64-12	7,0	13,0	18,3	21,8	24,5	26,6	28,1	29,4
63-16	3,5	7,0	9,6	11,5	12,8	14,0	14,5	15,4
64-16	4,8	9,0	12,4	14,8	16,5	17,8	19,0	20,0
73-10	12,1	22,5	30,4	35,9	40,0	42,5	44,5	46,5
74-10	17,2	31,8	42,2	50,0	55,0	58,8	61,2	64,2
73-12	10,4	20,5	27,1	31,9	35,8	38,2	40,0	41,6
74-12	14,2	25,8	34,5	41,6	45,7	48,7	51,0	53,4
73-16	7,3	14,3	19,1	21,8	25,0	26,8	27,8	29,1
74-16	10,5	19,1	25,4	29,6	32,6	34,8	35,9	37,2

17. Приведенный начальный пусковой ток ротора при заданной частоте (табл. 6-4) $I''_{к2f}$, А.

18. Ток статора двигателя при заданном статическом моменте нагрузки для заданной частоты (см. приложение 3) I_{1f}, А.

19. Вторичный приведенный ток двигателя при заданном статическом моменте и частоте (см. приложение 3) I''_{2f}, А.

20. Охлаждающая поверхность активной стали двигателя (табл. 6-1) $S_{охл}$, м^2.

21. Коэффициент теплоотдачи с поверхности $S_{охл}$ (табл. 6-1 — среднеопытные значения) α, Вт/(м²·°С).

22. Потери в стали при частоте 50 Гц (табл. 6-1) $P_с$, Вт. Потери в стали, Вт, при частоте f

$$P_{cf} = P_{c50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta},$$

где $\beta = 1,3 \div 1,5$.

23. Механические потери при 50 Гц (табл. 6-1) $P_{мех}$, Вт. Механические потери при частоте f

$$P_{мех f} = P_{мех 50} \left(\frac{f}{50}\right).$$

6-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПУСКА, ТОРМОЖЕНИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ

24. Суммарный момент инерции, кг·м², приведенный к валу двигателя,

$$\Sigma J = J_{мех} + J_{рот}.$$

25. Средний момент, Н·м, за время пуска в зависимости от частоты питающего напряжения и частоты вращения, до которой разгоняется двигатель $M_п = M_{к50} C_п$. Коэффициент $C_п$ — см. табл. 6-5.

26. Время пуска, с:

$$t_п = \frac{n \Sigma J}{9,55(M_п - M_с)}.$$

27. Средний момент при торможении, Н·м, равен:
а) при торможении противотоком

$$M_т = M_{к50} C_т$$

(коэффициент $C_т$ — см. табл. 6-6);

Таблица 6-5

Коэффициент $C_п$ для расчета среднего вращающего момента при разгоне до соответствующей частоты вращения n'_f

n'_f	Значения $C_п$ при частоте f, Гц							
	10	20	30	40	50	60	70	85
$0,4 n_{cf}$	0,37	0,65	0,855	0,975	1,03	1,04	1,02	0,97
$0,6 n_{cf}$	0,33	0,59	0,795	0,93	1,01	1,05	1,05	1,02
$0,8 n_{cf}$	0,29	0,53	0,73	0,875	0,96	1,00	1,02	1,02
$1,0 n_{cf}$	0,25	0,45	0,62	0,74	0,83	0,88	0,90	0,92

Таблица 6-6

Коэффициенты для расчета среднего момента при торможении противотоком $C_т$ и при динамическом торможении $C_д$

Коэффициенты	Частота, Гц							
	10	20	30	40	50	60	70	85
$C_т$	0,47	0,75	0,87	0,89	0,855	0,80	0,73	0,655
$C_д$	0,60	1,03	1,23	1,28	1,25	1,20	1,14	1,07

б) при динамическом торможении

$$M_д = M_{к50} C_д$$

(коэффициент $C_д$ — см. табл. 6-6).

Значения коэффициента $C_д$ рассчитаны для тока возбуждения $I_{в.макс}$, приведенного в табл. 6-1, при котором средний статический тормозной момент динамического торможения равен примерно 1,5-кратному статическому моменту двигателя за время пуска при частоте 50 Гц;

в) при самоторможении $M_с$, так как двигатель отключается от сети и торможение происходит за счет моментов нагрузки с учетом рольганга, если пренебречь торможением в подшипниках двигателя и трением вращающегося ротора о воздух. Момент $M_с$ всегда является реактивным.

28. Время торможения, с:

а) торможение противотоком

$$t_т = \frac{n\Sigma J}{9{,}55(M_т + M_с)};$$

б) динамическое торможение

$$t_д = \frac{n\Sigma J}{9{,}55(M_д + M_с)\left(\frac{I_в}{I_{в.макс}}\right)^2},$$

где $I_в$ — ток при динамическом торможении;

в) самоторможение

$$t_с = \frac{n\Sigma J}{9{,}55 M_с}.$$

29. Время одного цикла, с: $t_ц = 3600/Z$.

30. Относительная продолжительность включения, %:

$$ПВ = \frac{t_п + (t_т, t_д, t_с) + t_у}{t_ц} \cdot 100,$$

31. В расчете потерь при самоторможении $t_c=0$. Время работы при установившейся частоте вращения $t_у$, с, если задано ПВ, %, равно:

$$t_у=t_ц\frac{ПВ\,\%}{100}-t_п-t_{торм}(t_т,\ t_д,\ t_с).$$

6-4. ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ

32. Динамическая постоянная двигателя на 380 В, 50 Гц при заданной частоте вращения и ПВ определяется из табл. 1-5 или 1-6. Так как динамическая постоянная для одной и той же частоты линейно зависит от ПВ, то, построив график в соответствующем масштабе, можно легко определить динамическую постоянную для любых ПВ.

Динамическая постоянная для частоты, отличной от 50 Гц, определяется по формуле

$$Д_f=Д_{50}\left(\frac{50}{f}\right)^2=Д_{50}\left(\frac{n_{c50}}{n_{cf}}\right)^2.$$

Эта формула справедлива при определении динамической постоянной, исходя из теплового состояния двигателя.

Если рольганговый двигатель предназначен для работы в условиях тропического климата, где для двигателей серии АР при расчетной температуре окружающей среды +45°С принято превышение температуры обмотки статора +115°С (для нормальных климатических условий +120°С), полученную из табл. 6-7 динамическую постоянную следует уменьшить на 5%. Можно и не уменьшать, приняв превышение температуры 120°С, так как дополнительный запас не требуется.

33. Требуемая динамическая постоянная

$$Д_{тр}=KZ\alpha_р\Sigma J,$$

где $K=1$ при самоторможении; $K=2$ при динамическом торможении; $K=4$ при торможении противотоком; $\alpha_р$ — коэффициент разгона, обычно принимается 0,9—1,0.

В общем случае, когда применяется торможение разного рода,

$$Д_{тр}=Z_1\alpha_р\Sigma J+Z_2\alpha_р\Sigma J+3Z_3\alpha_р\Sigma J.$$

Если пуски и торможения совершаются с различными моментами инерции, это должно учитываться при расчете.

Электродвигатель считается пригодным для заданного режима работы, если

$$Д_{тр} < Д_{дв}.$$

Примечание. Способ учета статического момента при проверке динамической постоянной двигателей нуждается в разработке.

6-5. ПРОВЕРКА СРЕДНИХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Потери при работе с установившейся скоростью, Вт

34. Потери в обмотке статора

$$P_{м1} = 3I^2_1 r_1.$$

35. Потери в обмотке ротора

$$P_{м2} = 3I''^2_2 r''_2; \ r''_2 = \sigma^2 r'_2 \quad \text{(табл. 6-2)}.$$

36. Суммарные потери при работе с установившейся скоростью вращения

$$\Sigma P_у = P_{м1} + P_{м2} + P_с + P_{мех} + P_{доб}.$$

Добавочные потери

$$P_{доб} = 0{,}005 (\Sigma P'_у + P_2) \text{ при 50 Гц}; \ \Sigma P'_у = \Sigma P_у - P_{доб}.$$

Потери при пуске, Вт

37. Эквивалентный ток статора за время пуска, А,

$$I_{э1} = \sqrt{\frac{I^2_{к1} + I^2_1}{2}}.$$

38. Эквивалентный приведенный ток ротора за время пуска, А,

$$I''_{э2} = \sqrt{\frac{I''^2_{к2} + I'^2_2}{2}}.$$

39. Потери в обмотке статора при пуске

$$P_{м1п} = 3I^2_{э1} r_1.$$

40. Потери в обмотке ротора при пуске

$$P_{м2п} = 3I''^2_{э2} r''_2.$$

41. Суммарные потери при пуске двигателя

$$P_{п}=P_{м1п}+P_{м2п}+P_{с}+P_{мех}/2+P_{доб}.$$

Потери при пуске в обмотках статора и ротора можно определить точнее, если соответствующий эквивалентный ток вычислить по формуле

$$I_{э}=\sqrt{\frac{\sum_{1}^{m} I^2_m}{m}}.$$

По приведенным в табл. 6-2 значениям токов I_x, $I_{к1}$, $\cos\varphi_к$ холостого хода и $\cos\varphi_к$ короткого замыкания и диаметру круговой диаграммы можно легко построить круговую диаграмму. Это возможно, если учесть, что вытеснение в обмотке ротора практически отсутствует и насыщением стали можно пренебречь. Ошибка от этого не будет существенной.

По заданной нагрузке определяется ток статора и находится точка на окружности, соответствующая этой нагрузке. Таким образом, определится участок окружности, по которому будут перемещаться концы векторов статорного и приведенного роторного токов. Определение действующих значений токов статора и ротора во время пуска по указанной формуле не представляет затруднений.

На рис. 6-1 приведена для примера круговая диаграмма двигателя АР 43-12.

Рис. 6-1. Круговая диаграмма двигателя АР 43-12.

Порядок построения. Относительно вертикальной оси OA строим углы φ_x и $\varphi_к$ и в соответствующем масштабе токи I_x и $I_{к1}$, отметив их концы точками B и $Г$. Соединим прямой точки B и $Г$ и через середину отрезка $BГ$ под углом 90° проведем прямую, на которой расположен центр окружности $D_к$ (точка O').

Из точки O' проводим окружность радиусом $D_к/2$.

Разобьем окружность между точками E и $Г$ на несколько равных частей. Чем больше точек, тем точнее будет определен $\dot{I}^*_э$. Соединив эти точки с точками O и B, получим ряд токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}''_2$.

Предположим, что всего 10 точек, включая точки E и $Г$.

Тогда

$$I_{э1}=\sqrt{\frac{\sum_{1}^{10} I^2_{1m}}{10}}, \quad I''_{э2}=\sqrt{\frac{\sum_{1}^{10} I^2_{2m}}{10}}.$$

Потери при торможении противотоком, Вт

42. Эквивалентный ток статора

$$I_{э1т}=CI_{к1},$$

где $C=1{,}09\div1{,}13$ — коэффициент, его среднее значение равно около 1,11—1,12. Коэффициент C можно найти с помощью рис. 6-2, где $\dot{I}_{к1}$ — ток статора при коротком замыкании ($s=1$); $\dot{I}_{к1т}$ — ток статора при торможении противотоком ($s=2$).

Расчет коэффициента C по формулам

$$C_1=\frac{I_{к1}+I_{к1т}}{2I_{к1}} \text{ и } C_2=\sqrt{\frac{I^2_{к1}+I^2_{к1т}}{2I^2_{к1}}}$$

показал, что C_1 и C_2 практически равны, разница составляет примерно 1%.

Потери в обмотке статора

$$P_{м1т}=3I^2_{э1т}r_1.$$

Потери в обмотке ротора принимаются равными утроенным потерям в роторе при пуске. Нагрузка (моменты инерции) и схема включения двигателя предполагаются одинаковыми.

$$P_{м2т}=3P_{м2п}K_т,$$

где $K_т=t_п/t_т$.

* Предполагается, что ускорение при пуске постоянно.

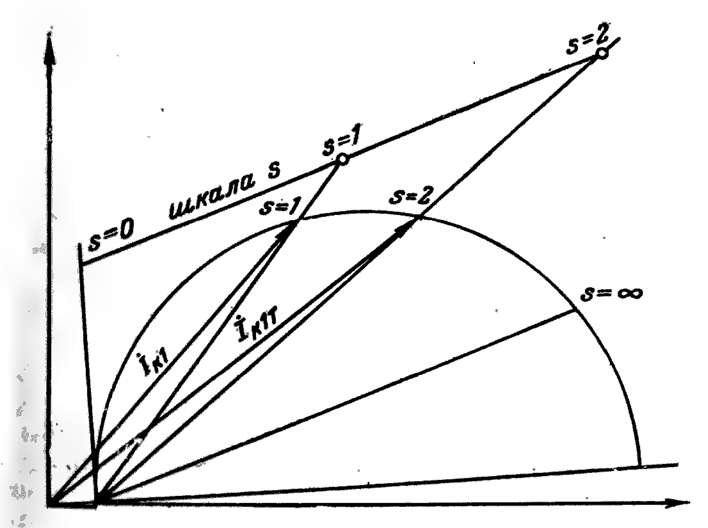


Рис. 6-2. Круговая диаграмма.

Общие потери в двигателе при торможении противотоком равны:

$$P_т = P_{м1т} + P_{м2т} + P_с + P_{мех}/2 + P_{доб}.$$

Потери при динамическом торможении, Вт

43. Потери в обмотке статора при включении обмотки по схеме «открытая звезда»

$$P_{м1д} = 2I^2_в r_1.$$

Потери в обмотке ротора принимаются приблизительно равными потерям при пуске (для одинаковых нагрузок)

$$P_{м2д} = P_{м2п} K_д,$$

где $K_д = t_п / t_д$.

Общие потери в двигателе при динамическом торможении

$$P_д{}^* = P_{м1д} + P_{м2д} + P'_с + P_{мех}/2 + P'_{доб}.$$

44. Общие средние потери за цикл

$$P_{ср\,ц} = \frac{P_у t_у + P_п t_п + P_{торм} t_{торм}}{t_ц}.$$

* Так как $P'_с < P_с$ и $P'_{доб} < P_{доб}$, можно без заметной ошибки пренебречь потерями в стали, добавочными и механическими потерями ввиду их малого значения.

Если применяется торможение как противотоком, так и динамическое, то общие средние потери определяются по формуле

$$P_{\text{ср.ц}} = \frac{P_{v} t_{v} Z_{1} + P_{\text{п}} t_{\text{п}} Z_{1} + P_{\text{т}} t_{\text{т}} Z_{3} + P_{\text{д}} t_{\text{д}} Z_{2}}{t_{\text{ц}} Z_{1}}.$$

Одновременное торможение противотоком и динамическим путем подпитки статора постоянным током на время противовключения применяется сравнительно редко и нами не рассматривается.

Ожидаемое превышение температуры обмотки статора

$$\Delta t_{\text{м1}} = P_{\text{ср.ц}} / S_{\text{охл}} \alpha,$$

где $S_{\text{охл}}$ и α — см. табл. 6-1.

Зная ожидаемое превышение температуры обмотки статора и температуру окружающей среды, можно судить о пригодности электродвигателя для эксплуатации.

У электродвигателей, предназначенных для умеренного климата с температурой окружающей среды до +45°С, превышение температуры обмотки статора допускается до +120°С.

У электродвигателей, предназначенных для работы в условиях тропического климата с расчетной температурой окружающей среды до +45°С, превышение температуры обмотки статора допускается до +115°С (дополнительный запас 5°С). Если температура окружающей среды выше указанной, но не более +60°С, то следует соответственно снизить допустимое превышение температуры обмотки статора.

В расчете принимается, что высота установки двигателей над уровнем моря — до 1000 м.

В табл. 6-2 приведены расчетные значения параметров, необходимых для построения уточненной круговой диаграммы по М. П. Костенко. В этой же таблице приведены расчетные значения двух мощностей двигателей: $P_{2\text{т}}$ — допустимая длительная мощность по превышению температуры обмотки статора в длительном режиме работы (ПВ=100%); $P_{2\text{п}}$ — допустимая мощность по перегрузке:

$$P_{2\text{п}} \leqslant 0{,}8 P_{2\text{макс}}; \qquad P_{2\text{т}} \leqslant P_{2\text{п}}.$$

Если допустимая мощность по перегрузке больше, чем допустимая по нагреву, то работа двигателя с мощностью $P_{2\text{п}}$ допускается только в кратковременном режиме работы.

Таблица 6-7

Максимальная расчетная мощность двигателей при частотах от 10 до 85 Гц $P_{2\,макс.расч}$, кВт

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	Частота, Гц							
	10	20	30	40	50	60	70	85
42-4	0,05	0,27	0,56	0,96	1,41	1,93	2,50	3,42
43-4	0,09	0,34	0,84	1,49	2,15	2,93	3,76	5,15
42-6	0,06	0,20	0,45	0,78	1,12	1,54	1,96	2,64
43-6	0,10	0,30	0,65	1,09	1,60	2,21	2,76	3,67
42-8	0,08	0,15	0,34	0,57	0,86	1,12	1,56	2,10
43-8	0,04	0,34	0,41	0,81	1,10	1,58	2,06	2,89
42-10	0,02	0,12	0,26	0,44	0,65	0,88	1,13	1,45
43-10	0,04	0,15	0,33	0,57	0,84	1,16	1,51	2,07
42-12	0,01	0,08	0,17	0,31	0,47	0,62	0,82	1,09
43-12	0,02	0,07	0,25	0,45	0,67	0,90	1,24	1,66
52-6	0,10	0,52	1,17	1,98	2,90	3,91	5,05	6,80
53-6	0,10	0,78	1,80	3,02	4,40	6,05	7,88	10,50
52-8	0,10	0,40	0,82	1,27	1,90	2,65	3,35	4,55
53-8	0,10	0,60	2,50	2,15	3,14	4,27	5,32	7,20
52-10	0,10	0,35	0,76	1,25	1,85	2,40	3,16	4,26
53-10	0,12	0,50	1,07	1,80	2,66	3,55	4,52	6,10
52-12	0,07	0,25	0,57	0,97	1,40	1,90	2,47	3,32
53-12	0,10	0,45	0,90	1,52	2,35	3,02	3,90	5,12
63-8	0,20	0,88	1,90	3,10	4,60	6,30	8,00	10,72
64-8	0,30	1,20	2,60	4,47	6,50	8,70	11,20	14,80
63-10	0,20	0,75	1,60	2,75	4,00	5,35	6,75	9,20
64-10	0,22	1,00	2,12	3,63	5,32	7,20	9,20	12,40
63-12	0,20	0,68	1,40	2,30	3,32	4,60	5,85	8,90
64-12	0,20	0,95	2,00	3,25	4,85	6,50	8,30	11,10
63-16	0,15	0,50	1,10	1,80	2,72	3,70	4,70	6,25
64-16	0,17	0,70	1,45	2,40	3,52	4,74	6,24	9,20
73-10	0,40	1,60	2,40	5,80	8,00	10,80	13,70	17,80
74-10	0,60	2,20	4,60	7,40	10,80	14,50	18,00	24,05
73-12	0,25	1,40	2,70	4,20	6,55	8,55	11,00	14,50
74-12	0,53	1,50	3,30	5,60	8,10	11,00	12,80	18,10
73-16	0,23	1,06	2,12	3,56	5,10	6,85	8,70	11,55
74-16	0,30	1,30	2,80	4,60	6,65	8,85	11,18	14,85

В табл. 6-7 приведены максимальные расчетные мощности двигателей серии АР при частотах от 10 до 85 Гц.

В табл. 6-8 приведены средние опытные значения параметров двигателей серии АР на 380 В, 50 Гц.

В тех случаях, когда нагрузка распределяется на большое число роликов, целесообразнее пользоваться средними опытными значениями величин, характеризующих работу двигателей. Если же нагрузка приходится на небольшое число роликов, следует принимать каталожные значения этих величин.

Таблица 6-8

Средние опытные значения параметров двигателей серии АР 380 В, 50 Гц

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	Короткое замыкание			Номинальная нагрузка					Холостой ход		$Д_{ср}$ (ПВ=25%)
	$M_{к.ср}$	$I_{к.ср}$	$P_{к.ср}$	P^*_2	к. п. д.	cos φ	$I_{1ср}$	$n_{ср}$	$I_{х.ср}$	$P^{**}_{х.ср}$	
	Нм/(кгс·м)	А	кВт	кВт	%	—	А	об/мин	А	Вт	кг·м²·ч⁻¹
42-4	17,6/1,8	8,8	4,3	1,1	76,5	0,83	2,6	1300	1,1	115	133
43-4	26,5/2,7	12,0	5,6	1,5	78,5	0,81	3,6	1380	1,5	145	158
42-6	21,6/2,2	7,2	3,4	0,9	71,6	0,69	2,8	870	1,8	165	275
43-6	31,4/3,2	10,3	4,7	1,2	74,0	0,69	3,6	870	2,4	175	328
42-8	24,5/2,5	6,3	3,3	0,7	65,5	0,63	2,6	645	2,0	200	440
43-8	29,4/3,0	7,2	3,6	0,9	67,5	0,63	3,2	630	2,5	225	563
42-10	21,6/2,2	5,2	2,6	0,5	56,5	0,54	2,5	511	2,4	315	588
43-10	29,4/3,0	6,9	3,4	0,65	57,0	0,52	3,3	515	3,3	400	708
42-12	19,6/2,0	4,2	2,0	0,3	40,0	0,44	2,6	420	2,7	440	825
43-12	24,5/2,7	5,7	2,5	0,4	46,0	0,40	3,3	435	3,6	485	900
52-6	46,1/4,7	15,0	7,5	2,0	73,5	0,82	5,0	870	2,4	185	525
53-6	84,3/8,6	27,0	12,6	2,8	81,0	0,82	6,4	870	3,4	230	625
52-8	51,0/5,2	11,7	5,4	1,6	73,0	0,76	4,4	640	2,5	190	925
53-8	83,4/8,5	18,0	9,0	2,2	80,0	0,70	6,0	640	4,0	240	1050
52-10	53,9/5,5	11,6	5,2	1,3	72,5	0,60	4,5	523	3,7	275	1325
53-10	83,4/8,5	16,6	7,3	1,8	74,0	0,60	6,2	520	5,3	340	1635
52-12	52,0/5,3	11,3	4,5	1,0	64,0	0,50	4,7	430	4,4	395	1675
53-12	91,2/9,3	16,5	7,2	1,4	65,0	0,42	7,9	440	7,6	610	2030
63-8	113/11,5	25,4	12,7	2,9	74,5	0,79	7,5	660	3,9	340	1375
64-8	157/16,0	33,0	16,5	3,5	78,0	0,80	8,5	660	5,0	430	1675

Продолжение табл. 6-8

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	Короткое замыкание			Номинальная нагрузка					Холостой ход		$Д_{ср}$ (ПВ=25%)
	$M_{к.ср}$	$I_{к.ср}$	$P_{к.ср}$	P^{*}_{2}	к. п. д.	cos φ	$I_{1\ ср}$	$n_{ср}$	$I_{х.ср}$	$P^{**}_{х.ср}$	
	Нм/(кгс·м)	А	кВт	кВт	%	—	А	об/мин	А	Вт	кг·м²·ч⁻¹
63-10	124/12,6	21,0	10,0	2,3	73,0	0,68	7,0	530	5,0	365	2100
64-10	161/16,4	30,0	14,5	2,8	77,7	0,67	8,2	544	6,4	435	2560
63-12	118/12,0	20,5	9,4	1,9	71,3	0,58	7,0	450	6,1	470	2840
64-12	172/17,5	29,6	14,0	2,3	71,0	0,55	8,9	435	8,4	570	3130
63-16	132/13,5	19,0	8,0	1,4	56,0	0,42	9,0	335	9,0	920	4400
64-16	161/16,4	26,0	10,9	1,7	56,5	0,41	11,1	340	11,5	1105	4870
73-10	261/26,6	48,0	22,4	5,0	80,0	0,79	12,0	530	7,4	470	3050
74-10	353/36,0	62,6	29,0	6,4	81,5	0,78	15,3	535	9,4	600	3230
73-12	226/23,0	36,0	16,0	4,1	77,8	0,65	12,3	450	9,8	620	4225
74-12	397/40,5	58,5	27,7	5,3	79,0	0,67	15,2	450	12,2	750	4525
73-16	252/25,7	34,5	14,8	3,0	69,0	0,47	14,0	335	13,7	990	6425
74-16	382/39,0	51,6	21,3	4,0	73,2	0,45	18,4	335	18,0	1120	7220
83-10	454/46,3	89,0	46,3	8,0	84,7	0,79	18,1	555	10,1	505	3750
84-10	637/65,0	115,0	61,0	10,0	85,0	0,80	22,3	580	12,7	585	4250
83-12	422/43,0	68,0	34,0	6,7	83,0	0,74	16,6	450	10,9	575	5650
84-12	593/60,5	97,5	47,7	8,3	83,8	0,73	20,6	450	13,6	660	6200
83-16	441/45,0	58,0	23,4	5,0	77,0	0,56	17,6	335	15,6	850	9500
84-16	618/63,0	80,0	32,0	6,4	80,0	0,53	23,0	340	22,0	1140	11 500
83-20	422/43,0	50,0	22,7	4,0	70,0	0,40	21,7	270	19,7	1400	13 000
84-20	564/57,5	63,8	30,0	5,0	71,0	0,42	25,4	270	25,0	1610	14 130

* Номинальные значения.

** $P_{х} = P_{ст} + P_{мех} + P_{м1} + P_{доб}$.

Завод-изготовитель продолжает работу по дальнейшему улучшению рабочих показателей электродвигателей серии АР. Завод-изготовитель по просьбе заказчика может подобрать наиболее экономичный электродвигатель для конкретных условий работы или проверить правильность выбранных двигателей для конкретных условий работы.

Область применения рольганговых двигателей серии АР расширяется. Этому способствуют высокая надежность и долговечность, простота обслуживания при эксплуатации этих машин.

6-6. ПРИМЕРЫ ПРОВЕРКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКЕ

Пример 1. Проверка электродвигателя АРК 73-16 380 В, 50 Гц для рельсобалочного стана.

Исходные данные: $f=21{,}5$ Гц, $U=163{,}5$ В, $Z=180$ включений в час, при этом: пусков $Z_1=180$, динамических торможений $Z_2=150$, торможений противотоком $Z_3=30$.

$$J_{мех}=J_{рол}+J_{заг}=3{,}950+9{,}375=13{,}325\ кг\cdot м^2.$$

Полагаем, что $J_{заг}$ при прокатке не изменяется.

$M_c=11{,}27$ Н·м при транспортировании; $M_c=112{,}7$ Н·м в течение 4 мин в час при пробуксовке.

ПВ=90%, $t_{окр}=40°С$; $I_в=40$ А.

Расчет.

$M_{к50}=252$ Н·м (среднеопытное значение); $J_{рот}=0{,}850$ кг·м²; $S_{охл}=0{,}427$ м²; $\alpha=36$ Вт/(м²·°С); $I_{к1}=23{,}1$ А; $I''_{к2}=15{,}0$ А; $r_1=1{,}06$ Ом (в горячем состоянии); $r'_2=3{,}56$ Ом (в горячем состоянии); $r''_2=\sigma^2 r'_2=1{,}188\cdot3{,}56=5{,}02$ Ом.

$$n_c=\frac{60f}{p}=\frac{60\cdot21{,}5}{8}=161\ об/мин.$$

При $M_c=11{,}27$ Н·м имеем $I_1=13{,}4$ А; $I''_2=1{,}2$ А; при $M_c=112{,}7$ Н·м имеем $I_1=16{,}35$ А; $I''_2=7{,}85$ А.

$$P_c=360\left(\frac{21{,}5}{50}\right)^{1{,}3}=120\ Вт;\ P_{мех}=15\ Вт.$$

$$\Sigma J=J_{мех}+J_{рот}=13{,}325+0{,}850=14{,}175\ кг\cdot м^2.$$

Средний момент за пуск при 21,5 Гц

$$M_п=M_{к50}C_п=252\cdot0{,}48=121\ Н\cdot м;$$

время пуска

$$t_п=\frac{n\Sigma J}{9{,}55(M_п-M_c)}=\frac{161\cdot14{,}175}{9{,}55(121-11{,}27)}=2{,}18\ с\approx2{,}20\ с;$$

средний момент при динамическом торможении

$$M_д=M_{к50}C_д=252\cdot1{,}07=268\ Н\cdot м;$$

средний момент при торможении противотоком

$$M_т = M_{к50} C_т = 252 \cdot 0{,}77 = 194 \text{ Н·м};$$

время динамического торможения

$$t_д = \frac{n\Sigma J}{9{,}55(M_д + M_с)\left(\frac{I_в}{I_{в.макс}}\right)^2} = \frac{161 \cdot 14{,}175}{9{,}55(268 + 11{,}27)\left(\frac{40}{40}\right)^2} = 0{,}855 \text{ с};$$

время торможения противотоком

$$t_т = \frac{n\Sigma J}{9{,}55(M_т + M_с)} = \frac{161 \cdot 14{,}175}{9{,}55(194 + 11{,}27)} = 1{,}17 \text{ с};$$

время цикла

$$t_ц = \frac{3600}{Z} = \frac{3600}{180} = 20 \text{ с};$$

среднее время торможения с учетом 150 торможений постоянным током и 30 торможений противотоком:

$$t_{торм.ср} = \frac{Z_2 t_д + Z_3 t_т}{Z} = \frac{150 \cdot 0{,}855 + 30 \cdot 1{,}17}{180} = 0{,}90 \text{ с};$$

в течение 4 мин (240 с) возможна пробуксовка, это время также должно быть учтено:

$$t_{букс} = 240/180 = 1{,}33 \text{ с};$$

время работы двигателя с установившейся частотой вращения

$$t_у = t_ц ПВ\,\%/100 - t_п - t_{торм.ср} - t_{букс} =$$
$$= 20\frac{90}{100} - 2{,}20 - 0{,}90 - 1{,}33 = 13{,}57 \text{ с}.$$

Проверка электродвигателя по динамической постоянной. Требуемая динамическая постоянная

$$Д_{тр} = \Sigma J(Z_1 + Z_2 + 3Z_3) = 14{,}175(180 + 150 + 3 \cdot 30) = 5940 \text{ кг·м}^2\text{·ч}^{-1};$$

динамическая постоянная двигателя с номинальными данными 380 В, 50 Гц при ПВ=90% и f=21,5 Гц

$$Д_{дв} = Д_{двПВ=90\%50}\left(\frac{f_{50}}{f_{21,5}}\right)^2 = 4280\left(\frac{50}{21{,}5}\right)^2 =$$
$$= 23\,200 \text{ кг·м}^2\text{·ч}^{-1};$$

динамическая постоянная определена по тепловому состоянию двигателя; $Д_{двПВ=90\%50}$ находится на прямой, проходящей через две точки ПВ=25%, $Д$=6000 и ПВ=100%, $Д$=4050 при 50 Гц. Шкала ПВ % строится в масштабе;

$$Д_{тр} \ll Д_{дв};$$

по динамической постоянной в требуемом режиме двигатель имеет большой запас.

Проверка электродвигателя по средним эквивалентным потерям. Потери при установившейся частоте вращения ротора

$$P_{м1} = 3I^2{}_1 r_1 = 3\cdot 13{,}4^2\cdot 1{,}06 = 572\ Вт;$$

$$P_{м2} = 3I_2''^2 r''_2 = 3\cdot 1{,}2^2\cdot 5{,}02 = 21{,}7\ Вт \approx 22\ Вт;$$

$$P_у = P_{м1} + P_{м2} + P_с + P_{мех} + P_{доб} =$$
$$= 572 + 22 + 120 + 15 + 20 = 749\ Вт \approx 750\ Вт;$$

$$P_{доб} = 0{,}005\frac{P_2}{\eta\cos\varphi}\frac{f}{f_{50}} \approx 0{,}005\frac{3000}{0{,}69\cdot 0{,}47}\frac{21{,}5}{50} = 20\ Вт.$$

Формула для определения $P_{доб}$ в зависимости от частоты требует уточнения, так как в настоящее время нет результатов исчерпывающих исследований по этому вопросу.

Добавочные потери без учета снижения частоты

$$P_{доб} = 46{,}3\ Вт\ и\ P_у = 775\ Вт.$$

Потери при пуске

$$I_{э1} = \sqrt{\frac{I^2_{к1} + I^2{}_1}{2}} = \sqrt{\frac{23{,}1^2 + 13{,}4^2}{2}} = 18{,}9\ А;$$

$$I''_{э2} = \sqrt{\frac{I''^2_{к2} + I''^2_2}{2}} = \sqrt{\frac{15{,}0^2 + 1{,}2^2}{2}} = 10{,}62\ А;$$

$$P_{м1п} = 3I^2_{э1} r_1 = 3\cdot 18{,}9^2\cdot 1{,}06 = 1137\ Вт;$$

$$P_{м2п} = 3I''^2_{э2} r''_2 = 3\cdot 10{,}62^2\cdot 5{,}02 = 1697\ Вт;$$

$$P_п = P_{м1п} + P_{м2п} + P_с + P_{мех}/2 + P_{доб} =$$
$$= 1137 + 1697 + 120 + 7{,}5 + 20 \approx 2982\ Вт.$$

Потери при торможении противотоком

$$I_{э1т} \approx 1{,}10 I_{к1} = 1{,}10\cdot 23{,}1 = 25{,}4\ А;$$

потери в обмотке статора

$$P_{м1т} = 3I^2_{э1т} r_1 = 3\cdot 25{,}4^2\cdot 1{,}06 = 2050\ Вт;$$

потери в обмотке ротора

$$P_{м2т} = 3P_{м2п}K_т = 3\cdot 1697\cdot 1{,}895 = 9650\ Вт;$$

$$K_т = t_п/t_т = 2{,}22/1{,}17 = 1{,}895;$$

суммарные потери

$$P_т = P_{м1т} + P_{м2т} + P_с + P_{мех}/2 + P_{доб} =$$
$$= 2050 + 9650 + 120 + 7{,}5 + 20 = 11\,848\ Вт.$$

Потери при динамическом торможении

$$I_в = I_{в.макс} = 40\ А;$$

потери в обмотке статора

$$P_{м1д} = 2\cdot 40^2\cdot 1{,}06 = 3390\ Вт;$$

потери в обмотке ротора

$$P_{м2д} = P_{м2п}K_д = 1697\cdot 2{,}57 = 4370\ Вт;$$

$$K_д = t_п/t_д = 2{,}20\cdot 0{,}855 = 2{,}57;$$

суммарные потери

$$P_д = P_{м1д} + P_{м2д} = 3390 + 4370 = 7760 \text{ Вт}.$$

Потерями в стали, механическими и добавочными пренебрегаем. Потери при пробуксовке

$$P_{м1б} = 3 \cdot 16{,}35^2 \cdot 1{,}06 = 849 \text{ Вт}; \quad P_{м2б} = 3 \cdot 7{,}85^2 \cdot 5{,}02 = 925 \text{ Вт};$$

суммарные потери при пробуксовке

$$P_б = P_{м1б} + P_{м2б} + P_с + P_{мех} + P_{доб} =$$

$$= 849 + 925 + 120 + 15 + 20 = 1929 \text{ Вт}.$$

Средние потери цикла за секунду

$$P_{ср.ц} = \frac{P_у t_у Z_1 + P_п t_п Z_1 + P_д t_д Z_2 + P_т t_т Z_3 + P_б t_б}{t} =$$

$$= \frac{750 \cdot 13{,}57 \cdot 180 + 2982 \cdot 2{,}20 \cdot 180 + 7760 \cdot 0{,}855 \cdot 150 + + 11848 \cdot 1{,}17 \cdot 30 + 1929 \cdot 240}{3600} = 1340 \text{ Вт}.$$

Ожидаемое превышение температуры обмотки статора

$$\Delta t_{м1} = \frac{P_{ср.ц}}{S_{охл}\alpha} = \frac{1340}{0{,}427 \cdot 36} = 87{,}5°\text{C} \approx 88°\text{C}.$$

По средним эквивалентным потерям электродвигатель АРК 73-16 также удовлетворяет заданному режиму работы и имеет значительный запас по превышению температуры обмотки статора.

К этому примеру необходимо сделать следующие замечания:

1. Если нет ограничения по начальному пусковому моменту, то следует проверить двигатель АРК 64-16 на 220 В и 20 Гц.

2. Для заданного режима работы следует также проверить двигатель АРК 63-16 на 220 В и 20 Гц.

Только конкретный расчет может определить наиболее экономичный тип электродвигателя.

Пример 2. Проверка электродвигателей АР 53-8 и АР 52-8 для привода механизма передвижения челнокового распределителя агломерационной машины К-1-200/312.

Исходные данные: $U = 380$ В, 50 Гц, $n_с = 750$ об/мин, $Z = 450$ реверсов в час, торможение противотоком, $J_{мех} = 0{,}2625$ кг·м²; $M_с = 6{,}77$ Н·м, ПВ = 100%, $t_{окр} = 50°$C.

I. *Электродвигатель АР 53-8.* $M_к = 68{,}6$ Н·м (каталожное значение); $J_{рот} = 0{,}080$ кг·м²; $r_1 = 1{,}87$ Ом (в горячем состоянии); $r'_2 = 6{,}84$ Ом (в горячем состоянии); $r''_2 = \sigma^2 r'_2 = 1{,}075^2 \cdot 6{,}84 = 7{,}9$ Ом; $I_{к1} = 19{,}5$ А (расчетное значение); $I''_2 = 16{,}7$ А (расчетное значение); $I_1 = 4{,}05$ А при $M_с = 6{,}77$ Н·м; $I''_2 = 0{,}90$ А при $M_с = 6{,}77$ Н·м; $S_{охл} = 0{,}2483$ м²; $\alpha = 39$ Вт/(м²·°С) — условный коэффициент теплоотдачи; $P_с = 126$ Вт — потери в стали; $P_{мех} = 25$ Вт — механические потери.

$$\Sigma J = J_{мех} + J_{рот} = 0{,}2625 + 0{,}080 = 0{,}3425 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Средний момент за пуск при 50 Гц

$$M_п = M_{к50} C_п = 68{,}6 \cdot 0{,}82 = 56{,}3 \text{ Н·м}.$$

Время пуска

$$t_п = \frac{n \Sigma J}{9{,}55 (M_п - M_с)} = \frac{750 \cdot 0{,}3425}{9{,}55 (56{,}3 - 6{,}77)} = 0{,}543 \text{ с};$$

средний момент при торможении противотоком при 50 Гц

$$M_т = M_{к50} C_т = 68{,}6 \cdot 0{,}85 = 58{,}3 \text{ Н·м};$$

время торможения противотоком

$$t_т = \frac{n \Sigma J}{9{,}55 (M_т + M_с)} = \frac{750 \cdot 0{,}3425}{9{,}55 (58{,}3 + 6{,}77)} = 0{,}413 \text{ с};$$

время цикла

$$t_ц = 3600/Z = 3600/450 = 8{,}0 \text{ с};$$

время установившейся работы

$$t_у = t_ц \text{ ПВ}\%/100 - t_п - t_т = 8{,}0 - 0{,}543 - 0{,}413 = 7{,}044 \text{ с}.$$

Проверка по динамической постоянной. Требуемая динамическая постоянная

$$Д_{тр} = 4 Z \Sigma J = 4 \cdot 450 \cdot 0{,}3425 = 617 \text{ кг·м}^2\text{·ч}^{-1}.$$

Фактическая ПВ двигателя для определения динамической постоянной неизвестна. Она больше 12% $\left[\text{ПВ}' = (t_п + t_т)/t_ц = \frac{(0{,}543 + 0{,}413) \cdot 100}{8} = 12\%\right]$, но меньше 100%.

Проверим самый тяжелый режим работы при ПВ = 100%.

Динамическая постоянная двигателя при ПВ = 100% равна 890 кг·м²·ч⁻¹ при температуре окружающей среды 45°С. При 50°С

$$Д_{дв} = 0{,}90 \cdot 890 = 800 \text{ кг·м}^2\text{·ч}^{-1}; \quad 45/50 = 0{,}90.$$

По динамической постоянной электродвигатель даже при ПВ = 100% удовлетворяет заданному режиму.

Проверка электродвигателя по средним эквивалентным потерям. Потери в установившемся режиме работы

$$P_{м1} = 3 I_1^2 r_1 = 3 \cdot 4{,}05^2 \cdot 1{,}87 = 92 \text{ Вт}; \quad P_{м2} = 3 I_2''^2 r_2'' = 3 \cdot 0{,}90^2 \cdot 7{,}9 = 19 \text{ Вт};$$

$$P_у = P_{м1} + P_{м2} + P_с + P_{мех} + P_{доб} = 92 + 19 + 126 + 25 = 262 \text{ Вт};$$

Добавочными потерями пренебрегаем.

а) Упрощенный расчет потерь при пуске и торможении противотоком. Эквивалентный ток статора

$$I_{э1} = \sqrt{\frac{I_{к1}^2 + I_1^2}{2}} = \sqrt{\frac{19{,}5^2 + 4{,}05^2}{2}} = 14{,}1 \text{ А};$$

эквивалентный ток ротора

$$I''_{э2} = \sqrt{\frac{I''^2_{к2} + I''^2_2}{2}} = \sqrt{\frac{16{,}7^2 + 0{,}90^2}{2}} = 11{,}8 \text{ А};$$

потери при пуске в обмотке статора

$$P_{м1п}=3\cdot 14{,}1^2\cdot 1{,}87=1114 \text{ Вт};$$

потери при пуске в обмотке ротора

$$P_{м2п}=3\cdot 11{,}8^2\cdot 7{,}9=3300 \text{ Вт};$$

суммарные потери при пуске (добавочными потерями пренебрегаем)

$$P_п=P_{м1п}+P_{м2п}+P_с+P_{мех}/2=1114+3300+126+13=4553 \text{ Вт}.$$

Эквивалентный ток в статоре при торможении противотоком

$$I_{э1т}=1{,}12 I_{к1}=1{,}12\cdot 19{,}5=21{,}8 \text{ А};$$

потери в обмотке статора при торможении противотоком

$$P_{м1т}=3I^2_{э1т}r_1=3\cdot 21{,}8^2\cdot 1{,}87=2670 \text{ Вт};$$

потери в обмотке ротора при торможении противотоком (момент инерции при пуске и торможении считаем одинаковым)

$$P_{м2т}=3P_{м2т}K_т=3\cdot 3300\cdot 1{,}31=13\,000 \text{ Вт};$$

$$K_т=t_п/t_т=0{,}543/0{,}413=1{,}31;$$

суммарные потери при торможении противотоком (добавочными потерями пренебрегаем)

$$P_т=P_{м1т}+P_{м2т}+P_с+P_{мех}/2=2670+13\,300+126+13\approx 16\,010 \text{ Вт}.$$

Средние потери за цикл

$$P_{ср.ц}=\frac{P_у t_у+P_п t_п+P_т t_т}{t_ц}=$$

$$=\frac{262\cdot 7{,}044+4553\cdot 0{,}543+16010\cdot 0{,}413}{8}=1375 \text{ Вт}.$$

Ожидаемое превышение температуры обмотки статора над 50°C

$$\Delta t_{м1}=\frac{P_{ср.ц}}{S_{охл}\alpha}=\frac{1375}{0{,}2483\cdot 39}=142°\text{C}.$$

С учетом разницы в температурах окружающей среды 50°C и оговоренной в ГОСТ 10283-69 45°C превышение температуры обмотки статора выше максимально допустимой величины 115°C (120—5=115°C). Электродвигатель АР 53-8 перегревается в заданном режиме работы.

б) Расчет эквивалентных токов и потерь при пуске и торможении с помощью упрощенной круговой диаграммы (рис. 6-3). Эквивалентные токи

$$I_{э1}=$$

$$=\sqrt{\frac{4{,}05^2+5{,}05^2+6{,}90^2+8{,}82^2+10{,}81^2+12{,}79^2+14{,}75^2+17{,}00^2+19{,}50^2}{9}}=12{,}2 \text{ А};$$

$$I''_{э2}=$$

$$=\sqrt{\frac{0{,}90^2+3{,}00^2+5{,}25^2+7{,}12^2+9{,}05^2+10{,}83^2+12{,}60^2+14{,}60^2+16{,}85^2}{9}}=10{,}2 \text{ А};$$

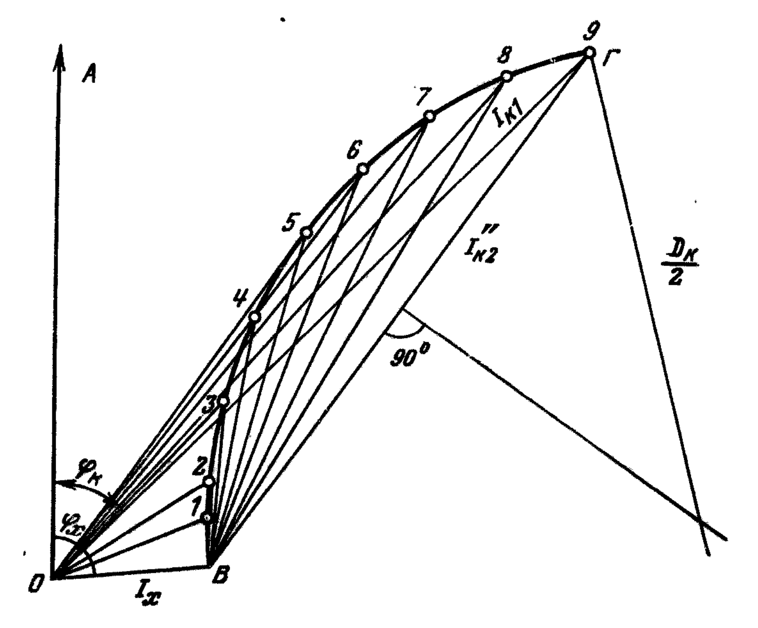


Рис. 6-3. Упрощенная круговая диаграмма для АР 53-8.

$$P_{м1п} = 3 \cdot 12{,}2^2 \cdot 1{,}87 = 833 \text{ Вт};$$

$$P_{м2п} = 3 \cdot 10{,}2^2 \cdot 7{,}9 = 2465 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери при пуске

$$P_п = 833 + 2465 + 126 + 13 = 3437 \text{ Вт}.$$

Эквивалентный ток в статоре при торможении противотоком

$$I_{э1т} = 1{,}12 I_{к1} = 1{,}12 \cdot 19{,}5 = 21{,}8 \text{ А}.$$

Потери в обмотке статора при торможении противотоком

$$P_{м1т} = 3I^2_{э1т} r_1 = 3 \cdot 21{,}8^2 \cdot 1{,}87 = 2670 \text{ Вт};$$

потери в обмотке ротора при торможении противотоком

$$P_{м2т} = 3 \cdot 2465 \cdot 1{,}31 = 9680 \text{ Вт};$$

суммарные потери при торможении противотоком

$$P_т = 2670 + 9680 + 126 + 13 \approx 12\,490 \text{ Вт};$$

средние потери за цикл

$$P_{ср.ц} = \frac{262 \cdot 7{,}044 + 3437 \cdot 0{,}543 + 12490 \cdot 0{,}413}{8} = 1110 \text{ Вт}.$$

Ожидаемое превышение температуры обмотки статора над 50°С

$$\Delta t_{м1} = \frac{P_{ср.ц}}{S_{охл}\alpha} = \frac{1110}{0,2483 \cdot 39} = 115°С.$$

При расчете потерь за время пуска с учетом эквивалентных токов по упрощенной круговой диаграмме двигатель АР 53-8 также непригоден для заданного режима работы, так как не имеет запаса по превышению температуры обмотки статора.

II. *Электродвигатель АР 52-8.* $M_к = 44,2$ Н·м (каталожное значение); $J_{рот} = 0,0525$ кг·м²; $r_1 = 3,85$ Ом (в горячем состоянии); $r'_2 = 11,00$ Ом (в горячем состоянии); $r''_2 = \sigma^2 r'_2 = 1,078^2 \cdot 11,0 = 12,75$ Ом; $I_{к1} = 11,9$ А (расчетное значение); $I''_{к2} = 10,1$ А (расчетное значение); $I_1 = 2,6$ А при $M_с = 6,77$ Н·м; $I''_2 = 0,76$ А при $M_с = 6,77$ Н·м; $S_{охл} = 0,2023$ м²; $\alpha = 44$ Вт/(м²·°С); $P_с = 93$ Вт; $P_{мех} = 25$ Вт.

$$\Sigma J = 0,2625 + 0,0525 = 0,315 \text{ кг·м}^2;$$

$$M_п = 44,2 \cdot 0,82 = 36,2 \text{ Н·м};$$

$$t_п = \frac{750 \cdot 0,315}{9,55(36,2 - 6,77)} = 0,835 \text{ с}; \quad M_т = 44,2 \cdot 0,85 = 37,5 \text{ Н·м};$$

$$t_т = \frac{750 \cdot 0,315}{9,55(37,5 + 6,77)} = 0,553 \text{ с}; \quad t_ц = \frac{3600}{450} = 8,0 \text{ с};$$

$$t_у = 8,0 - 0,835 - 0,553 = 6,612 \text{ с}.$$

Проверка по динамической постоянной. Требуемая динамическая постоянная

$$Д_{тр} = 4 \cdot 450 \cdot 0,315 = 567 \text{ кг·м}^2\text{·ч}^{-1}.$$

Фактическая ПВ% двигателя для определения динамической постоянной неизвестна. Она больше 17,4% $[ПВ' = (t_п + t_т)/t_ц = (0,835 + 0,553) \cdot 100/8 = 17,4\%]$, но меньше 100%.

Проверим самый тяжелый режим работы при ПВ = 100%.

При ПВ = 100% динамическая постоянная равна 770 кг·м²·ч⁻¹.

При температуре окружающей среды 50°С

$$Д_{дв} = 770 \cdot \frac{45}{50} = 693 \text{ кг·м}^2\text{·ч}^{-1}.$$

По динамической постоянной двигатель удовлетворяет заданному режиму работы.

Проверка электродвигателя по средним эквивалентным потерям. Потери в установившемся режиме работы

$$P_{м1} = 3 \cdot 2,6^2 \cdot 3,85 = 78 \text{ Вт}; \quad P_{м2} = 3 \cdot 0,76^2 \cdot 12,75 = 23 \text{ Вт};$$

$$P_у = 78 + 23 + 93 + 25 = 219 \text{ Вт}$$

(добавочными потерями пренебрегаем).

а) Упрощенный расчет потерь при пуске и торможении противотоком. Эквивалентные токи

$$I_{э1} = \sqrt{\frac{11,9^2 + 2,6^2}{2}} = 8,61 \text{ А}; \quad I''_{э2} = \sqrt{\frac{10,1^2 + 0,76^2}{2}} = 7,17 \text{ А};$$

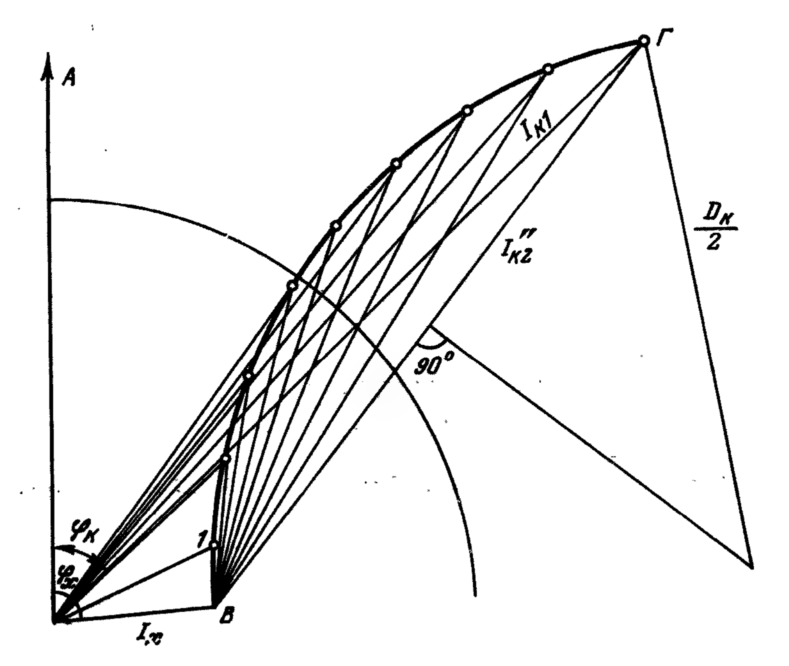


Рис. 6-4. Упрощенная круговая диаграмма для АР 52-8.

$P_{м1п} = 3 \cdot 8{,}61^2 \cdot 3{,}85 = 856$ Вт; $P_{м2п} = 3 \cdot 7{,}17^2 \cdot 12{,}75 = 1965$ Вт;
суммарные потери при пуске

$$P_п = 856 + 1965 + 93 + 13 = 2927 \text{ Вт};$$

потери при торможении противотоком

$$I_{01т} = 1{,}12 \cdot 11{,}9 \text{ А} = 13{,}3 \text{А};$$

потери в обмотке статора

$$P_{м1т} = 3 \cdot 13{,}3^2 \cdot 3{,}85 = 2043 \text{ Вт};$$

потери в обмотке ротора

$$P_{м2т} = 3 \cdot 1965 \cdot 1{,}51 = 8900 \text{ Вт}; \quad K_т = t_п / t_т = 0{,}835/0{,}553 = 1{,}51;$$

суммарные потери при торможении противотоком

$$P_т = 2043 + 8900 + 93 + 13 = 11\,049 \text{ Вт};$$

средние потери за цикл

$$P_{ср.ц} = \frac{219 \cdot 6{,}612 + 2927 \cdot 0{,}835 + 11049 \cdot 0{,}553}{8} = 1250 \text{ Вт}.$$

Ожидаемое превышение температуры обмотки статора над 50°С

$$\Delta t_{м1} = 1250/0{,}2023 \cdot 44 = 141{,}5 \text{°С};$$

с учетом разницы в температурах окружающей среды (заданной в условии задачи и оговоренной в ГОСТ 10283-69) превышение температуры обмотки статора больше максимально допустимого 115°С (120—5=115).

б) Расчет эквивалентных токов при пуске с помощью упрощенной круговой диаграммы (рис. 6-4). Эквивалентные токи

$$I_{э1}=$$
$$=\sqrt{\frac{2,60^2+3,40^2+4,55^2+5,80^2+7,10^2+8,50^2+9,80^2+10,80^2+11,90^2}{9}}=$$
$$=7,8\text{А};$$
$$I''_{э2}=$$
$$=\sqrt{\frac{0,76^2+1,85^2+3,20^2+4,40^2+5,70^2+6,90^2+8,15^2+9,05^2+10,05^2}{9}}=$$
$$=6,3\ \text{А};$$

$$P_{м1п}=3\cdot 7,8^2\cdot 3,85=703\ \text{Вт};\ P_{м2п}=3\cdot 6,3^2\cdot 12,75=1518\ \text{Вт};$$

суммарные потери при пуске

$$P_п=703+1518+93+13=2327\ \text{Вт};$$

эквивалентный ток в статоре при торможении противотоком

$$I_{э1т}=1,12I_{к1}=1,12\cdot 11,9=13,3\ \text{А};$$

потери в обмотке статора при торможении противотоком

$$P_{м1т}=3\cdot 13,3^2\cdot 3,85=2043\ \text{Вт};$$

потери в обмотке ротора при торможении противотоком

$$P_{м2т}=3\cdot 1518\cdot 1,51=6900\ \text{Вт};$$

суммарные потери при торможении противотоком

$$P_т=2043+6900+93+13=9049\ \text{Вт}\approx 9050\ \text{Вт};$$

средние потери за цикл

$$P_{ср.ц}=\frac{219\cdot 6,612+2327\cdot 0,835+9050\cdot 0,553}{8}=1050\ \text{Вт};$$

ожидаемое превышение температуры обмотки статора (над 50°С)

$$\Delta t_{м1}=\frac{1050}{0,2023\cdot 44}=118°\text{С},\ \text{что больше}\ 115°\text{С}.$$

В условии примера не оговаривалась необходимость проверки двигателя на максимально допустимый и минимально необходимый начальные пусковые моменты двигателя.

Оба двигателя (АР 53-8 и АР 52-8) не удовлетворяют заданному режиму работы при окружающей температуре +50°С.

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ, МОНТАЖУ И РЕМОНТУ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для рольганговых двигателей не требуется специальная тепловая защита даже при перегрузках. Электродвигатели должны правильно выбираться для конкретных условий работы. Для них требуется только защита на случай обрыва фазы.

При правильном выборе рольганговые двигатели серии АР показали высокую надежность и долговечность в условиях тяжелой работы на металлургических заводах. Наблюдаемый выход из строя составляет 1—2 в год на 1000 работающих двигателей. Заложенный в конструкцию двигателей ресурс работы составляет более 15 лет без замены обмотки статора.

Электродвигатели с двумя свободными концами вала допускают работу только в горизонтальном положении.

При эксплуатации двигателей примерно через 5—6 лет следует их разбирать для профилактического осмотра и мелкого ремонта. Обмотку статора необходимо очистить от пыли и грязи, просушить, а лобовые части покрыть эмалью ПКЭ-19 или ПКЭ-22. При эксплуатации порядка 10 лет обмотку статора (разумеется, в станине) следует пропитать в лаке КО-916К, а лобовые части покрыть указанной выше эмалью. С целью предохранения от коррозии нарушенное защитное покрытие бочки ротора, а также внутреннюю поверхность статора следует восстановить путем нанесения тонкого просвечивающего слоя изоляционной эмали (например, ГФ92ГС) или кремнийорганического лака КО-916 или КО-916К. Это целесообразно делать при профилактических осмотрах с разборкой двигателей при снятых подшипниках.

После пропитки обмотки в лаке КО-916К осуществляется сушка в печи 8—10 ч при 180—200°С.

При покрытии лобовых частей эмалями ПКЭ, а наружной поверхности ротора и внутренней поверхности статора лаком КО-916 или КО-916К сушка в печи должна проводиться 4—5 ч при 180—200°С. После покрытия наружной поверхности ротора и внутренней поверхности

статора эмалью ГФ92ГС — сушка в печи 3—5 ч при 100—120°С.

Подшипники рассчитаны для работы в течение 2—3 лет. По мере их износа они должны заменяться. Двигатели выпускаются с заложенной в подшипники рабочей, а не консервационной смазкой.

Консистентная смазка в подшипниках при нормальной работе сохраняется до 0,5—1 года. В течение этого времени требуется пополнение смазки. При тяжелых режимах работы и тяжелых окружающих условиях пополнение смазки требуется чаще (появляется стук в подшипниках). Через 2—3 пополнения необходима промывка подшипников (при разобранном двигателе) и закладка новой смазки.

Как указывалось выше, основное исполнение двигателей серии АР (380 В, 50 Гц) допускает работу при частоте питающего напряжения в диапазоне от 10 до 70 Гц при пропорциональном изменении напряжения и частоты.

Следует особо оговорить, что при выборе электродвигателей, работающих при высоких скоростях, непременно должна исследоваться конструкция системы механизм — двигатель (например, рольганг — двигатель) на вибрацию, что особенно важно при применении двигателей с полым валом типа АРК. На случай, если система механизм — двигатель по вибрации допускает работу двигателей и на более высоких частотах, в книге приведены характеристики двигателей при частоте 85 Гц. Но повторяем, что пользоваться высокими частотами без исследования вибрации системы опасно, так как резонансная частота может разрушить конструкцию.

Для работы в условиях повышенной температуры окружающего воздуха до +200°С, а также для работы в тяжелых условиях теплового режима разработано специальное исполнение двигателей с водяным охлаждением. Температура окружающей воды — не выше +30°С. Необходимое количество технической воды для охлаждения двигателя — 105—110 л/ч на 1 кВт потерь [давление в водопроводной сети ориентировочно 0,05—0,1 МПа (0,5—1 кгс/см^2)]. Охлаждение двигателя водой во время эксплуатации должно осуществляться в следующей последовательности: вода вводится в камеру подшипникового щита с рабочей стороны, затем в камеру подшипникового щита с противоположной сто-

роны и далее переходит в камеру охлаждения станины. Если камера подшипникового щита с противоположной стороны привода будет охлаждаться последней, то подшипник двигателя с этой стороны может перегреться. При параллельном соединении охлаждаемых камер за-

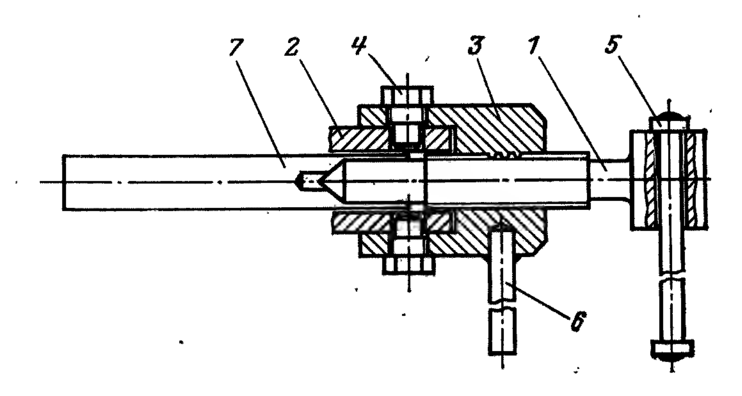


Рис. 7-1. Съемник для снятия двигателей АРК с ролика рольганга.
1 — винт; 2 — вал двигателя; 3 — гайка; 4 — болт; 5 — рукоятка; 6 — штифт; 7 — стержень.

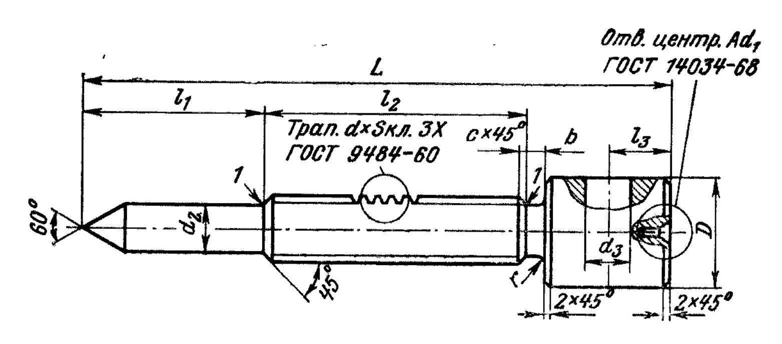


Рис. 7-2. Винт съемника.

Тип двигателя АРК	L	D	$d \times s$	Ad_1	d_2	d_3	l_1	l_2	l_3	b	c	r
4	249	55	28×5	6,3	21,0	24	75	106	30	8	3,0	2,0
5	307	60	34×6		26,0	26	100	127	35	10	3,5	3,0
6,7	381	70	44×8	8,0	33,8	30	120	169	40	12	4,5	

трудняется контроль за протеканием воды через каждую камеру, а при нарушении охлаждения любой из камер двигатель выйдет из строя.

Для насадки электродвигателей с полым конусным валом типа АРК на хвостовик ролика рольганта или хвостовик вала редуктора используется натяжной винт (см. рис. 7-11).

Для снятия двигателей типа АРК с хвостовиков роликов рольгангов рекомендуется пользоваться съемником, эскиз которого приведен на рис. 7-1. На рис. 7-2—7-4 приведена деталировка некоторых деталей съемника — винта, гайки и стержня для 4—7-го габаритов.

Для возможности ремонта и замены обмотки статора в табл. 7-1 приведен расход некоторых (основных) материалов на один электродвигатель.

На рис. 7-5 показан эскиз пазовой коробки, а на рис. 7-6 — эскиз междуслойной прокладки в пазу.

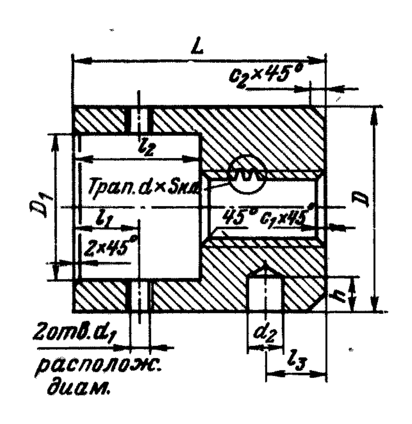


Рис. 7-3. Гайка съемника.

Тип двигателя АРК	L	D	D_1	l_1	l_2	l_3	d_1	d_2	h	c_1	c_2	$d \times s$
4	120	90	50			28	М30	20		3,0	3	28×5
5	153	100	60	32	64	44,5		22	25	3,5	5	34×6
6,7	193	115	75			64,5	М36	24		4,5	8	44×8

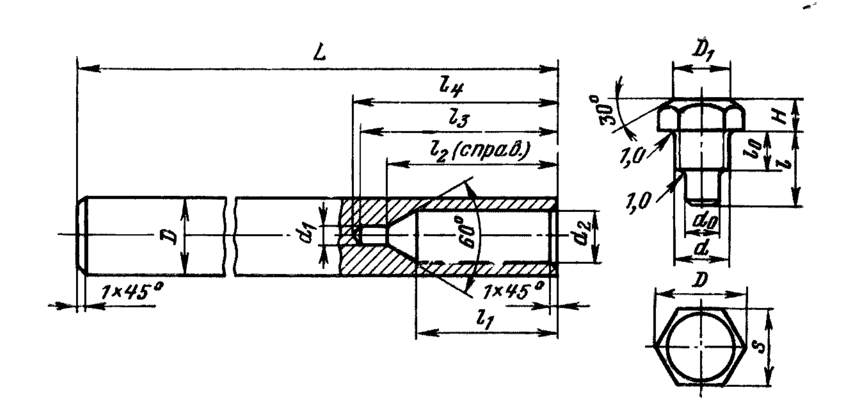


Рис. 7-4. Стержень съемника и болт.

Тип двигателя	Размеры стержня, мм								Размеры болта, мм							
	l	D	d_1	d_2	l_1	l_2	l_3	l_4	D	D_1	s	H	l	l_0	d_0	d
4	258	29,5	10	20,5	46,9	54,5	68,3	74,9	45,2	36,9	41	17	29	19	21,5	30
5	300	35,5	12	25,5	67,4	77,8	92,4	99,4					31			
6	325	44,5	16	33,3	82,0	95,8	115,0	122,0	55,4	45,0	50	20	34		26,5	36
	363															

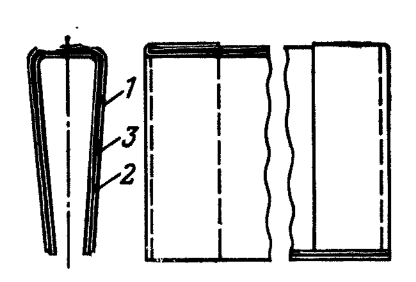


Рис. 7-5. Коробка пазовая.

1 и *2* — стеклолакоткань ЛСК; *3* — стекломиканит $Г_2$ФКП.

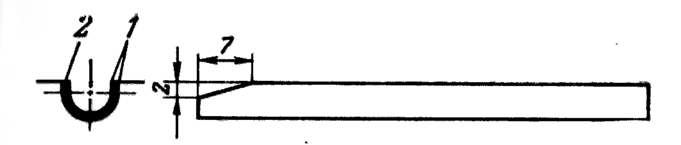


Рис. 7-6. Изоляция междуслойная.
1 — стеклолакоткань ЛСК; 2 — стекломиканит $Г_2ФКП$ (склеить лаком).

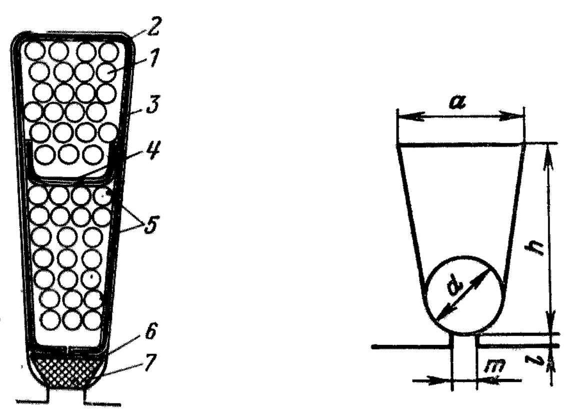


Рис. 7-7. Разрез паза статора.
1 — медь; 2 — коробка пазовая; 3 — стекломиканит $Г_2ФКП$; 4 — междуслойная прокладка; 5 – стеклолакоткань ЛСК; 6 — кремнийоргаиический стеклотекстолит толщиной 0,35—0,5 мм; 7 — клин (кремнийоргаиический стеклотекстолит).
Рис. 7-8. Паз статора.

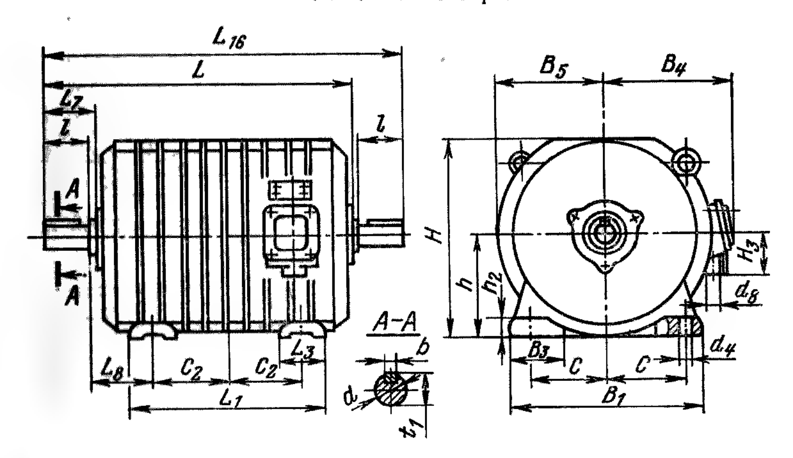


Рис. 7-9. Габаритные и установочные размеры двигателей серии АР 4—8-го габаритов.

Рис. 7-10. Габаритные и установочные размеры двигателей серии АРФ 4—7-го габаритов.

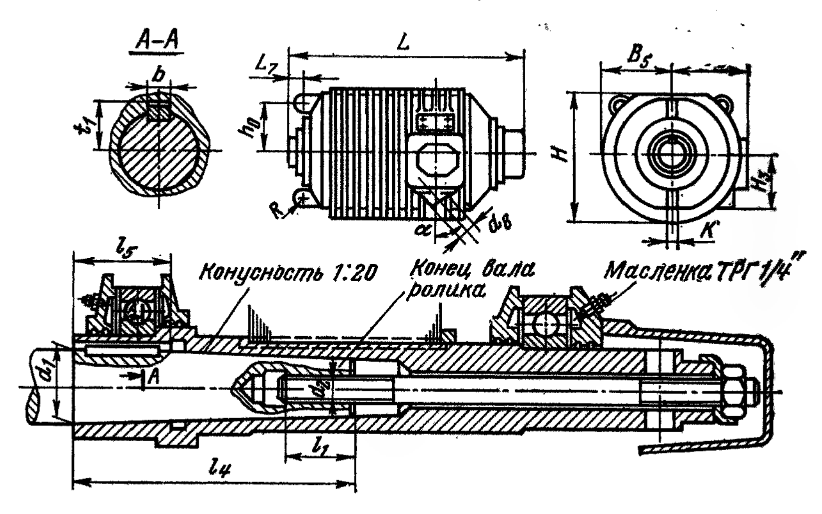


Рис. 7-11. Габаритные и установочные размеры двигателей серии АРК 4—7-го габаритов.

Таблица 7.3

Расход некоторых материалов на 1 двигатель

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	Коробка пазовая (рис. 7-5)			Междуслойная прокладка в пазу (рис. 7-6)		На двигатель					
	ЛСК		$Г_2ФКII$								
	поз. *1*	поз. *2*		ЛСК	$Г_2ФКII$	ЛСК	$Г_2ФКII$	РКГМ	КО-916К	ПКЭ-19	ЦИАТИМ 221
	мм	мм	мм	мм	мм	м²	кг	м	кг	кг	кг
42	50×130	52×165	50×130	20×180	20×180	1,46	0,243	0,70	0,43	0,080	0,05
43	50×170	52×205	50×170	20×210	20×210	1,84	0,288	0,70	0,45	0,080	0,05
52	63×160	65×204	63×160	20×215	20×215	2,66	0,443	0,82	0,49	0,093	0,08
53	63×220	65×264	63×220	20×265	20×265	3,24	0,595	0,82	0,55	0,093	0,08
63	58×163	60×211	58×163	27×203	27×203	3,12	0,845	0,76	0,91	0,126	0,19
64	58×208	60×256	58×208	27×248	27×248	3,62	0,986	0,76	1,05	0,126	0,19
73	64×213	66×261	64×213	28×253	28×253	4,79	1,286	0,79	1,40	0,144	0,25
74	64×278	66×326	64×278	28×318	28×318	5,99	1,576	0,79	1,60	0,144	0,25
83	64×278	66×332	64×278	29×336	29×336	8,25	2,373	1,21	2,48	0,230	0,43
84	64×365	66×422	64×365	29×424	29×424	9,52	2,843	1,21	2,70	0,230	0,43

Примечания: 1. Стеклолакоткань кремнийорганическая ЛСК толщиной 0,15 мм.

2. Стекломиканит кремнийорганический $Г_2ФКII$: для АР 4 и 5-го габаритов — 0,25, для АР 6 — 8-го габаритов — 0,4 мм.

3. В норме расхода ЛСК и $Г_2ФКII$ на двигатель включены пазовая, междуслойная и междуфазная (лобовая часть) изоляции и изоляция внутримашинных соединений.

4. Сечение провода РКГМ для выводных концов: АР 4-го габарита — 1 мм²; АР 5 — 1,5 мм², АР 6 — 2,5 мм², АР 7 — 6 мм², АР 8 — 16 мм².

5. Кремнийорганический лак КО-916К — для двукратной пропитки статора.

6. Кремнийорганическая эмаль ПКЭ-19 (заменитель ПКЭ-22) — для покрытия лобовых частей обмотки.

7. ЦИАТИМ-221 (заменитель ЦИАТИМ-203) — смазка для подшипников.

Таблица 7-2

Размеры паза статора, мм

Тип двигателя АР, АРФ, АРК	a	m	d	h	l	Тип двигателя АР, АРФ, АРК	a	m	d	h	l
42, 43	9,2	3,0	6,0	21,4	0,6	73, 74	12,6	3,2	10,0	27,0	1,0
52, 53	9,7	3,2	6,1	29,0	0,75	83, 84	11,2	3,5	9,2	28,0	1,0
63, 64	13,0	3,2	10,5	23,5	1,0						

Таблица 7-3

Габаритные и установочные размеры двигателей серии АР 4—8-го габаритов (рис. 7-9)

Тип двигателя АР	Габаритные размеры, не более, мм						Установочные размеры, мм									Справочные размеры, мм							Масса, кг
	L	L_{16}	H	B_1	B_4	B_5	$2C$	$2C_2$	d_4	L_8	h	d	l	b	t_1	d_8	B_3	H_3	h_2	l_1	L_3	L_7	
42, 43	475	556	240	260	170	135	210	150	15	100	125	32	80	10	35,5	1" труб	130	80	22	200	52	85	65/70
52, 53	600	714	317	355	205	180	285	200	19	117	170	40	110	10	43,5	1" труб	180	80	30	260	62	115	135/150
63, 64	630	766	395	425	270	225	350	270	19	138	200	50	110	14	54	1¼" труб	105	95	35	375	105	132	225/250
73, 74	760	922	470	485	290	255	400	340	24	151	250	60	140	16	65	1¼" труб	115	95	40	465	125	164	353/395
83, 84	955	1115	535	585	335	295	490	480	30	188,5	280	75	140	20	81	1¼" труб	145	105	50	625	145	178	650/725

Таблица 7-4

Габаритные и установочные размеры для двигателей серии АРФ 4—7-го габаритов (рис. 7-10)

Тип двигателя АРФ	Габаритные размеры, не более, мм					Установочные размеры, мм									Справочные размеры, мм								Масса, кг
	L	L_{16}	H	B_4	B_5	h_6	L_{11}	d	l	b	t_1	D_3	D_4	d_6	n	L_7	h	h_5	h_7	H_3	D_2	d_8	
42, 43	475	556	247	160	135	4	93	32	80	10	35,5	150	185	15	4	85	112	12	—	80	220	1" труб	65/70
52, 53	600	714	327	190	180	4	122	40	110	10	43,5	215	255	19	4	115	147	14	—	130	305	1" труб	135/150
63, 64	630	766	445	235	225	5	97	50	110	14	54	300	350	19	8	—	195	18	13	—	400	1¼" труб	225/250
73, 74	760	922	475	255	255	5	124	60	140	16	65	350	400	19	8	—	220	20	16	—	450	1¼" труб	355/395

Таблица 7-5

Габаритные и установочные размеры двигателей серии АРК 4—7-го габаритов

Исполнение электродвигателя АРК	Габаритные размеры,				h_8	L_7	Установочные размеры									Справочные размеры			Масса, кг
	L	H	B_4	B_5			d_8	K	t_1	b	d_1	l_4	l_1	l_5	d_2	H_3	R	α	
	не более, мм							мм								мм			
42, 43	545	247	160	135	90	29,5	1" труб	18	28,3	14	50	210	50	62	M20×1,5	75	18	30°	70/75
52, 53	645	327	190	180	118	29	1" труб	24	39,1	16	70	260	60	75	M24×3,0	145	20	30	140/155
63, 64	720	445	235	225	160	32,5	1¼" труб	25	44,1	18	80	300	75	115	M30×3,5	200	28	0	230/255
73, 74	810	475	255	255	183	27,5	1¼" труб	27	52,1	20	95	350	90	120	M36×4,0	225	30	0	360/400

Таблица 7-6

Габаритные и установочные размеры электродвигателей с водяным охлаждением АРФВ 5 и АРФВ 6

Тип двигателя АРФВ	Габаритные размеры, не более, мм				Установочные размеры, мм								
	L	H	B_4	B_5	h_6	L_{11}	d	l	b	t_1	D_3	D_4	d_6
52, 53	600	327	190	180	4	122	40	110	10	43,5	215	255	19
63, 64	630	445	250	225	5	97	50	110	14	54	300	350	19

Продолжение табл. 7-6

Тип двигателя АРФВ	n	Справочные размеры						Масса, кг
		L_7	h	h_5	D_2	d_8	α	
		мм						
52, 53	4	115	147	14	305	1" труб	30°	135/150
63, 64	8	130	195	18	400	1¼" труб	15°	235/260

На рис. 7-7 приведен эскиз паза статора с изоляцией и заложенной обмоткой, а на рис. 7-8 и в табл. 7-2 — размеры паза статора.

На рис. 7-9 и в табл. 7-3 приведены габаритные и установочные размеры электродвигателей серии АР 4—8-го габаритов (исполнение М100 — на лапах); на рис. 7-10 и в табл. 7-4 показаны установочные размеры

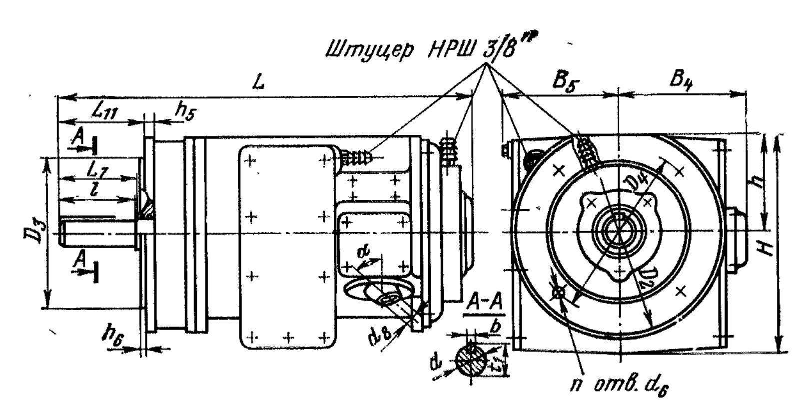


Рис. 7-12. Габаритные и установочные размеры электродвигателей с водяным охлаждением АРФВ 5 и 6-го габаритов.

для АРФ 4—7-го габаритов (исполнение М300—с фланцем); на рис. 7-11 и в табл. 7-5 — приведены установочные размеры для исполнения с полым конусным валом типа АРК 4—7-го габаритов. На рис. 7-12 и в табл. 7-6 даны размеры двигателей АРФВ 5 н 6-го габаритов (фланцевое исполнение с водяным охлаждением).

Приложение I

Статические механические характеристики динамического торможения рольганговых электродвигателей серии АР

s	Тормозной момент, Н·м, при токах торможения, А										
	8	10	12	14	18	6	8	10	12	14	16
	АР 42-4					АР 42-6					
0,05	12,7	13,5	13,7	14,1	—	9,3	9,8	10,1	10,4	10,5	—
0,1	25,3	27,5	28,9	30,2	—	19,1	23,4	25,9	26,5	26,9	—
0,2	35,3	44,6	—	—	—	23,9	33,8	43,6	—	—	—
0,4	26,1	38,0	49,0	—	—	21,9	39,7	53,9	—	—	—
0,6	18,0	28,0	40,1	—	—	16,2	28,6	44,1	58,8	—	—
0,8	13,9	21,2	30,3	41,4	—	12,3	22,0	33,7	48,5	64,5	—
1,0	10,8	16,3	23,5	33,3	—	9,8	17,2	27,3	39,7	53,4	—
	АР 43-4					АР 43-6					
0,05	15,7	18,1	21,1	22,9	26,0	10,0	11,8	12,7	13,2	13,7	13,8
0,1	24,5	29,4	33,3	37,3	42,2	17,8	21,3	23,5	24,9	26,0	27,0
0,2	33,0	45,1	57,4	65,7	76,5	24,5	34,3	40,8	45,2	48,5	51,9
0,4	19,6	31,4	44,7	57,4	—	17,2	29,4	45,6	62,3	—	—
0,6	12,1	18,1	27,5	37,3	61,3	12,2	21,3	32,8	47,3	63,7	—
0,8	9,0	14,0	21,1	28,5	42,2	8,3	16,4	25,5	35,7	48,5	63,7
1,0	7,4	11,7	16,2	22,8	38,2	7,6	14,1	21,1	29,4	40,7	52,5

s	Тормозной момент, Н·м, при токах торможения, А									
	6	8	10	12	14	6	8	10	12	14
	АР 42-8					АР 42-10				
0,05	8,6	9,8	9,9	10,0	10,1	5,9	6,3	6,5	6,6	—
0,1	17,7	18,8	19,6	19,7	19,8	12,2	13,2	13,7	13,7	—
0,2	29,4	34,3	37,1	38,7	39,4	22,6	25,5	26,5	27,0	—
0,4	32,8	52,1	64,2	70,4	75,0	35,5	45,5	50,5	53,4	—
0,6	24,5	42,8	64,3	—	—	31,5	51,7	71,6	—	—
0,8	19,6	33,6	51,9	73,6	—	25,5	46,0	65,4	81,1	—
1,0	15,7	27,6	42,7	61,3	82,5	20,7	39,2	57,9	78,5	—
	АР 43-8					АР 43-10				
0,05	12,4	13,2	13,7	13,7	13,7	7,6	8,3	8,8	9,1	9,2
0,1	21,1	25,5	28,4	30,9	31,9	14,2	16,4	16,9	17,2	17,6
0,2	32,4	44,3	53,2	57,9	60,3	26,3	30,9	33,3	34,8	35,3
0,4	29,4	49,0	68,6	84,3	93,2	31,4	49,0	58,8	66,7	71,6
0,6	21,6	37,3	57,4	78,5	—	25,5	43,0	65,5	81,4	92,0
0,8	15,9	28,9	44,1	63,7	86,3	19,6	35,3	55,4	76,5	95,9
1,0	13,7	23,0	36,3	52,0	70,6	16,7	29,4	45,9	65,2	87,3

s	Тормозной момент, Н·м, при токах торможения, А										
	6	8	10	12	8	12	16	20	24	26	28
	AP 42-12				AP 52-8						
0,05	4,9	5,4	5,9	6,2	23,5	27,9	30,9	31,9	32,5	—	—
0,1	9,8	10,3	10,7	10,7	43,2	54,4	60,8	64,7	66,7	—	—
0,2	18,1	21,6	23,5	24,5	53,9	90,8	108	122	131,4	—	—
0,4	33,2	39,7	42,1	43,5	47,1	98,1	—	—	—	—	—
0,6	36,2	49,5	57,6	63,0	29,4	68,6	108	—	—	—	—
0,8	35,7	51,0	64,8	74,0	19,6	49,0	86,5	128		—	—
1,0	27,0	44,1	64,5	78,6	15,4	39,2	69,8	108		—	—
	AP 43-12				AP 53-8						
0,05	6,4	6,7	6,8	6,8	23,5	33,3	38,8	39,7	41,2	42,2	43,2
0,1	11,5	13,1	13,7	14,0	39,2	62,4	74,5	78,4	80,4	81,4	81,4
0,2	22,1	26,1	27,8	28,1	33,7	76,5	108	133	151	157	159
0,4	32,1	48,0	55,4	60,4	21,6	49,0	87,7	133	188	214	—
0,6	28,3	49,0	63,7	74,8	15,3	33,3	61,8	96,1	137	160	186
0,8	24,0	41,6	61,2	81,6	10,8	25,1	47,1	74,5	106	124	141
1,0	20,4	36,2	53,9	73,6	9,8	19,6	37,3	58,8	86,3	100	114

s	Тормозной момент, Н·м, при токах торможения, А										
	8	12	16	20	24	28	32	9	15	21	27
	АР 52-10							АР 52-12			
0,05	15,7	19,6	22,6	23,7	—	—	—	14,1	15,7	16,8	—
0,1	28,4	37,3	43,3	47,6	50,0	—	—	27,9	34,3	40,2	—
0,2	47,6	71,4	83,8	92,2	—	—	—	49,0	67,7	82,0	—
0,4	44,6	96,1	147	—	—	—	—	53,0	116	133	—
0,6	28,4	71,4	118	172	—	—	—	44,1	116	—	—
0,8	19,6	49,0	83,8	131	186	—	—	36,1	94,1	175	—
1,0	17,4	39,2	68,6	103	157	—	—	29,4	79,9	152	—
	АР 53-10							АР 53-12			
0,05	18,6	25,5	29,4	30,0	31,8	33	34,3	15,7	21,6	24,5	24,9
0,1	30,4	48,6	58,8	62,8	66,7	70	74,5	22,4	42,2	47,0	49,0
0,2	35,3	74,5	102	119	130	137	145	35,3	78,5	95,1	104
0,4	27,5	60,8	105	157	211	—	—	35,3	94,1	157	189
0,6	19,6	44,1	78,4	122	175	229	—	22,4	75,5	145	216
0,8	17,3	35,3	58,8	92,2	135	182	239	21,6	62,8	126	202
1,0	12,7	27,5	49,0	76,1	110	149	196	17,6	51,0	113	184

s	Тормозной момент, Н·м, при токах торможения, А									
	16	24	32	40	48	10	20	30	40	50
			АР 63-10					АР 64-10		
0,05	42,8	51,0	58,4	59,8	62,8	34,5	94,1	143	180	196
0,1	76,5	97,1	118	124	134	43,2	138	223	267	290
0,2	121	179	219	258	294	34,5	176	314	380	412
0,4	80,4	186	304	—	—	23,5	106	275	—	—
0,6	58,8	141	249	—	—	19,6	90,2	223	392	—
0,8	45,1	100	176	279	392	13,3	66,7	182	329	—
1,0	35,3	78	142	222	326	7,8	54,9	143	243	373
			АР 63-12					АР 64-12		
0,05	44,1	54,4	59,3	61,3	63,7	25,5	47,1	54,9	56,9	56,9
0,1	71,6	93,2	111	124	135	39,2	88,3	102	106	108
0,2	118	163	196	225	251	47,1	145	196	211	220
0,4	105	212	331	—	—	31,4	124	255	392	498
0,6	77,0	172	294	417	—	19,6	86,3	188	328	471
0,8	57,9	133	233	353	476	13,7	66,7	149	257	404
1,0	44,1	107	191	294	417	11,0	54,9	122	211	326

s	Тормозной момент, Н·м, при токах торможения, А						
	12	16	20	24	28	32	36
				АР 63-16			
0,05	17,6	23,5	27,1	29,4	31,2	31,8	32,1
0,1	33,8	44,1	52,4	58,6	61,8	64,7	65,3
0,2	61,8	86,8	103	113	122	126	132
0,4	63,3	124	176	221	247	253	274
0,6	53,0	103	154	212	259	297	324
0,8	44,1	76,5	125	181	235	279	324
1,0	33,8	64,7	103	147	199	250	302
				АР 64-16			
0,05	14,7	19,6	29,4	33,3	36,3	39,2	41,7
0,1	29,4	49,0	56,4	68,6	78,5	83,4	90,7
0,2	56,4	87,3	113	142	167	189	203
0,4	49,0	88,3	147	196	260	302	332
0,6	44,1	73,6	117	179	255	324	373
0,8	37,8	63,7	98,1	156	228	304	375
6,0	29,4	49,0	88,3	130	189	245	324

Приложение 2

Динамические механические характеристики динамического торможения рольганговых электродвигателей серии АР

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин										
	100	200	300	400	500	700	900	1000	1200	1400	1500
	АР 42-4					$K_к = 14$					
5	15,7	17,5	17,0	14,5	12,5	9,8	7,8	7,2	5,9	5,4	5,2
6	17,0	21,6	22,3	19,6	17,0	13,5	10,8	9,8	7,8	7,0	6,9
7	19,6	24,8	26,5	25,1	22,1	17,2	13,7	12,7	10,3	9,1	8,8
8	21,1	28,4	31,9	31,6	27,8	21,6	17,3	16,0	13,0	11,2	10,4
9	22,6	30,4	34,6	35,8	34,0	25,5	21,0	18,6	15,0	13,0	12,6
	АР 43-4					$K_к = 11,3$					
7	21,8	24,0	24,5	19,8	16,6	11,9	8,8	7,5	6,3	5,2	4,3
9	28,0	34,5	35,9	30,6	25,1	17,3	14,0	12,7	10,7	8,6	8,1
11	32,8	44,1	47,7	43,7	35,8	24,5	19,2	17,6	14,7	13,0	12,2
13	34,8	49,0	53,4	54,6	48,3	33,4	26,1	23,8	19,9	17,3	16,7
15	39,8	59,0	64,3	65,0	60,1	46,7	35,9	31,7	26,1	22,8	21,7
	АР 42-6					$K_к = 14$					
5	13,6	15,7	14,7	12,2	10,4	7,6	5,5	4,9	4,0	3,4	3,2
6	15,0	20,0	18,6	15,5	13,4	10,0	7,6	7,2	6,4	5,3	5,1
7	18,2	23,3	22,6	20,2	17,2	12,7	11,1	10,0	8,3	7,4	6,9
8	19,6	26,5	27,1	25,1	22,0	15,8	13,4	12,7	10,8	9,3	8,8
9	20,6	29,2	30,7	29,4	26,1	19,9	16,2	15,0	13,0	11,6	11,1

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин										
	100	200	300	400	500	700	900	1000	1200	1400	1500
	АР 43-6					$K_к = 11{,}3$					
6	11,4	14,3	13,0	10,1	8,0	6,4	5,2	4,8	3,9	—	—
8	14,8	18,2	18,2	15,0	12,0	9,8	7,8	7,2	6,9	—	—
10	16,7	22,2	23,5	20,6	17,3	14,0	11,8	10,8	9,8	—	—
12	20,2	25,3	26,8	28,4	22,8	17,6	15,0	13,9	13,0	—	—
	АР 42-8					$K_к = 11{,}9$					
5	14,7	17,5	16,0	13,2	11,4	7,8	6,4	5,9	—	—	—
6	16,7	22,6	19,2	16,2	13,8	10,4	8,1	7,2	—	—	—
7	18,8	23,5	22,6	19,4	16,7	12,7	10,4	9,1	—	—	—
8	21,6	27,1	26,1	22,6	19,6	14,0	12,4	11,4	—	—	—
	АР 43-8					$K_к = 11{,}3$					
6	18,6	22,8	20,3	16,5	13,4	9,4	6,5	5,5	—	—	—
7	22,9	30,4	26,8	22,3	18,6	13,7	10,3	8,9	—	—	—
8	28,4	37,3	34,3	29,0	24,8	18,6	14,7	13,0	—	—	—
9	31,7	42,5	42,1	36,3	31,7	24,5	18,6	17,0	—	—	—
10	34,6	46,7	45,1	44,3	39,2	30,9	23,5	20,2	—	—	—
	АР 42-10					$K_к = 14$					
3	9,8	11,1	9,7	7,8	6,7	5,5	4,5	4,2	—	—	—
4	13,3	15,7	13,7	11,7	9,8	7,8	6,6	6,5	—	—	—
5	15,3	20,3	18,6	13,8	14,0	10,8	9,2	8,9	—	—	—
6	18,2	24,8	23,5	21,2	18,8	14,8	12,7	12,1	—	—	—

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин										
	100	200	300	400	500	700	900	1000	1200	1400	1500
	АР 43-10					$K_к = 11,3$					
5	13,0	15,7	13,7	11,5	8,4	6,2	4,1	3,2	—	—	—
6	15,3	19,2	18,9	15,4	12,4	7,8	5,7	5,2	—	—	—
7	16,7	23,5	24,1	19,6	15,8	10,5	6,9	6,5	—	—	—
8	18,2	27,1	28,4	24,8	19,9	12,6	8,6	6,6	—	—	—

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин							
	100	200	300	400	500	700	900	1000
	АРК 42-12				$K_к = 12$			
3	6,5	9,1	8,5	6,4	5,2	3,6	2,9	2,7
4	9,4	13,3	12,7	10,8	8,8	7,3	6,2	5,5
5	13,3	17,0	17,0	15,0	12,8	10,8	8,8	8,2
6	14,0	20,2	22,2	20,3	17,6	14,2	12,2	11,4
	АР 43-12				$K_к = 11,3$			
5	14,0	17,3	16,4	14,1	12,3	9,1	7,8	7,4
6	17,1	21,6	21,9	18,6	15,9	12,2	10,4	9,8
7	18,5	24,5	25,7	22,8	19,6	15,1	13,2	12,3
8	20,1	27,2	28,9	26,6	22,8	17,8	15,7	14,8

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин							
	100	200	300	400	500	700	900	1000
	АР 52-8				$K_к = 6,85$			
7	40,7	40,2	30,4	22,6	18,1	11,8	8,8	7,8
9	58,4	59,9	49,0	39,8	32,8	23,7	18,8	17,2
11	74,5	78,8	66,0	55,2	48,3	36,3	29,4	24,7
13	83,8	98,1	87,1	72,6	61,8	46,1	36,8	34,2
15	89,2	109	109	92,2	78,4	60,3	49,0	40,4
	АР 53-8				$K_к = 4,5$			
13	57,1	58,8	46,7	27,5	31,4	22,6	17,2	14,7
15	65,7	71,2	60,0	48,4	40,4	28,4	22,1	19,6
18	82,4	88,9	82,5	69,2	57,2	42,2	32,4	24,9
20	89,7	103	99,5	89,2	77,5	57,4	40,4	39,7
23	103	123	123	114	99,0	75,0	58,8	52,0
	АР 52-10				$K_к = 6,85$			
7	30,4	29,4	22,6	16,2	13,2	8,3	5,8	4,9
9	41,7	45,1	37,1	28,0	22,6	15,9	12,4	10,8
11	51,0	62,8	56,4	45,6	38,0	27,1	20,6	18,8
13	64,2	77,5	73,6	60,0	49,0	36,3	28,4	26,0
15	70,2	90,7	87,3	75,3	62,8	46,5	37,1	34,5
	АР 53-10				$K_к = 4,5$			
13	55,9	56,4	47,6	37,6	30,4	21,6	15,4	14,7
15	68,6	77,5	60,8	51,5	42,2	31,4	24,0	21,1
18	81,5	95,4	88,3	75,0	63,7	45,1	34,3	32,5
20	88,3	106	103	89,0	75,5	54,5	41,2	37,3
22	98,1	119	118	108	89,1	66,7	50,5	44,1

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин							
	100	200	300	400	500	700	900	1000
			АРК 52-12			$K_к = 5,14$		
7	27,0	29,4	22,6	18,1	14,7	9,8	7,4	6,6
9	35,3	39,2	34,9	28,8	23,5	17,2	12,8	11,8
11	45,7	52,2	49,8	42,7	36,3	27,0	21,6	19,6
13	51,6	67,7	67,5	57,8	49,0	37,3	29,9	26,5
			АР 53-12			$K_к = 4,5$		
13	57,9	64,7	63,2	55,5	48,0	38,2	31,0	29,4
15	63,0	76,3	79,4	69,8	65,7	48,0	39,2	36,0
17	70,6	88,3	94,1	86,3	73,6	58,4	49,0	45,7
19	75,5	94,6	103	100	88,3	70,5	58,8	55,7
21	83,4	108	120	116	104	88,5	71,6	67,2

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения об/мин							
	100	200	300	500	700	800	900	1000
			АР 63-10			$K_к = 4,95$		
15	71,1	54,4	39,2	19,6	10,8	9,8	8,8	7,6
17	88,3	77,0	54,1	30,4	17,6	15,5	13,7	12,7
19	108	105	76,5	45,3	32,4	29,4	25,7	24,5
22	121	135	108	67,5	47,1	41,4	38,2	34,4
25	142	162	140	92,2	64,7	56,4	50,0	46,9

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин							
	100	200	300	500	700	800	900	1000
	АР 64-10				$K_к = 5,165$			
20	154	127	88,3	52,4	32,2	25,2	21,1	16,8
23	190	165	118	72,6	51,1	42,0	34,7	31,2
26	223	220	168	106	75,6	55,8	57,1	50,4
29	256	256	206	135	104	92,4	83,8	78,4
32	309	311	255	178	133	118	112	99,4
	АР 63-12				$K_к = 4,95$			
13	72,6	65,7	49,0	24,5	14,7	12,3	11,8	—
15	89,2	84,3	59,8	33,8	21,6	18,1	15,5	—
18	112	118	89,5	53,9	40,4	36,5	32,4	—
20	118	133	108	70,6	52,0	46,1	43,4	—
22	137	155	125	85,3	66,7	61,8	58,8	—
	АР 64-12				$K_к = 5,165$			
20	111	97,3	71,1	42,0	27,9	22,4	19,6	17,6
23	147	131	103	63,7	44,8	39,2	33,5	29,4
26	167	162	127	82,6	58,8	53,0	45,1	42,0
29	173	179	149	98,1	74,2	66,1	57,9	50,0
31	182	199	167	109	84,1	75,6	66,7	58,8
	АР 63-16				$K_к = 4,95$			
13	76,7	63,7	45,5	27,9	20,9	19,6	—	—
15	93,0	81,4	60,8	32,8	28,2	26,5	—	—
18	115	108	83,4	54,9	43,2	40,5	—	—
20	139	127	103	70,7	58,8	54,4	—	—
22	151	152	123	86,8	71,6	63,0	—	—

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин							
	100	200	300	500	700	800	900	1000
	АР 64-16				$K_к = 5,165$			
20	140	127	89,6	51,6	29,4	23,0	19,6	—
23	157	175	132	82,4	56,9	47,6	42,0	—
26	197	206	164	107	78,5	68,6	60,2	—
29	234	250	202	138	103	84,3	78,4	—
31	244	266	226	157	119	105	90,2	—

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
	АР 73-10					$K_к = 4,14$			
35	271	257	171	118	78,1	62,5	45,9	33,4	26,5
40	324	319	235	169	121	94,1	76,5	64,7	53,0
45	382	403	300	226	171	138	118	102	91,2
50	462	471	365	282	224	185	162	136	124
55	558	550	447	360	288	235	206	180	162
	АР 74-10					$K_к = 4,0$			
50	409	406	324	253	206	165	138	121	109
60	532	530	422	326	285	235	206	185	165
65	618	618	489	387	324	278	247	218	192
70	665	658	537	425	353	305	271	241	213
75	736	731	600	470	382	327	291	262	232

Ток торможения, А	Тормозной момент, Н·м, при частоте вращения, об/мин								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
			АР 73-12				$K_к = 4,14$		
30	315	253	188	138	103	76,5	60,3	47,1	35,3
35	377	340	249	191	147	118	94,1	76,5	65,3
40	441	435	312	244	195	156	132	112	99,4
45	507	512	404	315	249	206	174	150	135
50	531	602	506	398	330	271	230	197	175
			АР 74-12				$K_к = 4,0$		
45	444	365	265	203	155	119	94,1	76,5	—
50	531	447	330	247	188	153	129	106	—
55	556	515	390	294	230	188	159	138	—
60	621	587	459	359	287	230	204	179	—
65	688	708	556	448	359	287	257	227	—
			АР 73-16				$K_к = 4,14$		
24	171	132	106	64,7	42,7	29,4	23,5	17,1	—
28	206	182	126	92,7	71,5	58,8	45,3	35,3	—
32	244	230	169	124	100	82,4	67,7	58,8	—
36	280	277	218	164	130	109	89,7	79,4	—
40	341	339	265	197	159	133	112	97,1	—
			АР 74-16				$K_к = 4,0$		
40	459	344	259	191	138	102	77,1	62,4	—
45	518	448	325	253	194	156	121	97,1	—
50	565	562	417	327	262	210	169	134	
55	618	663	515	412	327	265	212	171	—
60	759	747	633	505	407	330	265	210	—

Приложение 3

Токи статора и приведенные токи ротора электродвигателей серии АР в зависимости от нагрузки

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)											
	2,94/0,3	3,92/0,4	4,90/0,5	5,88/0,6	7,84/0,8	9,81/1,0	3,92/0,4	5,88/0,6	7,84/0,8	11,8/1,2	15,7/1,6	19,6/2,0
	АР 42-4						АР 43-4					
	Ток статора I_1						Ток статора I_1					
10	1,34	1,60	1,97	—	—	—	1,86	2,22	2,90	—	—	—
20	1,32	1,54	1,74	2,00	2,70	3,67	1,86	2,22	2,73	4,00	5,70	—
30	1,32	1,54	1,74	1,93	2,60	3,27	1,86	2,22	2,70	3,80	5,15	7,00
40	1,32	1,54	1,74	1,93	2,50	3,14	1,86	2,22	2,70	3,70	4,85	6,40
50	1,32	1,54	1,74	1,93	2,50	3,07	1,86	2,22	2,70	3,70	4,80	6,20
60	1,32	1,54	1,74	1,93	2,50	3,00	1,80	2,15	2,52	3,65	4,75	6,10
70	1,32	1,54	1,74	1,93	2,40	2,97	1,80	2,15	2,52	3,65	4,75	5,95
85	1,32	1,54	1,74	1,93	2,40	2,97	1,80	2,15	2,52	3,65	4,75	5,95
	Ток ротора I''_2						Ток ротора I''_2					
10	0,80	1,20	1,60	—	—	—	1,15	1,75	2,40	—	—	—
20	0,70	1,00	1,30	1,66	2,36	3,25	1,00	1,65	2,10	3,40	5,20	—
30	0,67	0,93	1,20	1,60	2,16	2,80	1,00	1,50	2,00	3,10	4,45	6,20
40	0,67	0,93	1,20	1,60	2,10	2,65	1,00	1,45	1,90	3,00	4,25	5,70
50	0,67	0,93	1,20	1,60	2,10	2,55	1,00	1,45	1,90	2,95	4,10	5,45
60	0,67	0,93	1,20	1,60	2,10	2,55	0,90	1,35	1,80	2,90	4,00	5,30
70	0,67	0,93	1,20	1,60	2,10	2,50	0,90	1,35	1,80	2,90	4,00	5,20
85	0,67	0,93	1,20	1,60	2,10	2,50	0,90	1,35	1,80	2,90	4,00	5,20

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)											
	2,94/0,3	3,92/0,4	4,90/0,5	5,88/0,6	7,84/0,8	9,81/1,0	3,92/0,4	5,88/0,6	7,84/0,8	11,8/1,2	15,7/1,6	19,6/2,0
	АР 42-6						АР 43-6					
	Ток статора I_1						Ток статора I_1					
10	1,78	1,80	1,88	2,02	—	—	2,35	2,40	2,60	—	—	—
20	1,78	1,80	1,88	1,98	2,35	2,75	2,35	2,40	2,60	3,25	4,17	—
30	1,78	1,80	1,88	1,98	2,30	2,70	2,35	2,40	2,60	3,25	4,05	5,00
40	1,78	1,80	1,88	1,98	2,30	2,62	2,35	2,40	2,60	3,25	4,00	4,85
50	1,78	1,80	1,88	1,98	2,30	2,62	2,35	2,40	2,60	3,20	3,90	4,75
60	1,78	1,80	1,88	1,98	2,30	2,60	2,35	2,40	2,60	3,20	3,90	4,70
70	1,78	1,80	1,88	1,98	2,30	2,60	2,35	2,40	2,60	3,20	3,90	4,70
85	1,78	1,80	1,88	1,98	2,30	2,60	2,35	2,40	2,60	3,20	3,90	4,70
	Ток ротора I''_2						Ток ротора I''_2					
10	0,50	0,68	0,93	1,17	—	—	0,60	0,95	1,40	—	—	—
20	0,50	0,65	0,80	1,05	1,40	1,90	0,60	0,95	1,25	2,05	3,00	—
30	0,50	0,65	0,80	1,00	1,35	1,75	0,60	0,95	1,25	1,95	2,80	3,80
40	0,50	0,65	0,80	0,95	1,30	1,70	0,60	0,95	1,25	1,95	2,65	3,50
50	0,50	0,65	0,80	0,95	1,30	1,70	0,60	0,95	1,25	1,95	2,65	3,50
60	0,50	0,65	0,80	0,95	1,30	1,70	0,60	0,95	1,25	1,95	2,65	3,40
70	0,50	0,65	0,80	0,95	1,30	1,70	0,60	0,95	1,25	1,95	2,65	3,40
85	0,50	0,65	0,80	0,95	1,30	1,70	0,60	0,95	1,25	1,95	2,65	3,40

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)											
	$\frac{2,94}{0,3}$	$\frac{3,92}{0,4}$	$\frac{4,90}{0,5}$	$\frac{5,88}{0,6}$	$\frac{7,84}{0,8}$	$\frac{9,81}{1,0}$	$\frac{3,92}{0,4}$	$\frac{5,88}{0,6}$	$\frac{7,84}{0,8}$	$\frac{11,8}{1,2}$	$\frac{15,7}{1,6}$	$\frac{19,6}{2,0}$
	АР 42-8						АР 43-8					
	Ток статора I_1						Ток статора I_1					
10	1,90	1,95	2,05	2,20	—	—	2,18	2,25	2,45	—	—	—
20	1,90	1,90	1,94	2,00	2,10	2,39	2,18	2,25	2,35	2,8	3,70	—
30	1,90	1,90	1,94	2,00	2,10	2,32	2,18	2,25	2,35	2,72	3,35	4,40
40	1,90	1,90	1,94	2,00	2,10	2,32	2,18	2,25	2,35	2,72	3,30	4,05
50	1,90	1,90	1,94	2,00	2,10	2,32	2,18	2,25	2,35	2,72	3,30	4,00
60	1,90	1,90	1,94	2,00	2,10	2,32	2,18	2,25	2,35	2,72	3,28	3,90
70	1,90	1,90	1,94	2,00	2,10	2,32	2,18	2,25	2,35	2,72	3,28	3,85
85	1,90	1,90	1,94	2,00	2,10	2,32	2,18	2,25	2,35	2,72	3,28	3,85
	Ток ротора I''_2						Ток ротора I''_2					
10	0,40	0,50	0,75	1,00	—	—	0,50	0,85	1,25	—	—	—
20	0,40	0,50	0,65	0,75	1,10	1,50	0,45	0,70	1,05	1,70	2,65	—
30	0,40	0,50	0,65	0,75	1,03	1,35	0,45	0,70	1,00	1,57	2,25	3,25
40	0,40	0,50	0,65	0,75	1,03	1,30	0,45	0,70	0,95	1,50	2,15	2,95
50	0,40	0,50	0,65	0,70	1,00	1,25	0,45	0,70	0,95	1,50	2,06	2,80
60	0,40	0,50	0,65	0,70	1,00	1,25	0,45	0,70	0,95	1,50	2,06	2,75
70	0,40	0,50	0,65	0,70	1,00	1,25	0,45	0,70	0,95	1,50	2,00	2,65
85	0,40	0,50	0,65	0,70	1,00	1,25	0,45	0,70	0,95	1,50	2,00	2,60

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)											
	2,94/0,3	3,92/0,4	4,90/0,5	5,88/0,6	7,84/0,8	9,81/1,0	3,92/0,4	5,88/0,6	7,84/0,8	11,8/1,2	15,7/1,6	19,6/2,0
	АР 42-10						**АР 43-10**					
	Ток статора I_1						Ток статора I_1					
10	2,26	2,30	2,34	2,40	—	—	3,10	3,15	3,25	—	—	—
20	2,26	2,28	2,29	2,36	2,48	2,67	3,10	3,15	3,20	3,40	4,00	—
30	2,26	2,28	2,29	2,32	2,42	2,57	3,10	3,15	3,20	3,40	3,84	4,55
40	2,26	2,28	2,29	2,32	2,40	2,56	3,10	3,15	3,20	3,37	3,75	4,32
50	2,26	2,28	2,29	2,32	2,40	2,55	3,10	3,15	3,20	3,37	3,75	4,23
60	2,26	2,28	2,29	2,32	2,40	2,55	3,10	3,15	3,20	3,37	3,67	4,12
70	2,26	2,28	2,29	2,32	2,40	2,55	3,10	3,15	3,20	3,37	3,67	4,12
85	2,26	2,28	2,29	2,32	2,40	2,55	3,10	3,15	3,20	3,37	3,67	4,12
	Ток ротора I''_2						Ток ротора I''_2					
10	0,30	0,42	0,57	0,75	—	—	0,45	0,75	1,00	—	—	—
20	0,30	0,42	0,55	0,65	0,95	1,27	0,45	0,65	0,82	1,40	2,15	—
30	0,30	0,40	0,50	0,60	0,83	1,10	0,45	0,65	0,82	1,25	1,82	2,60
40	0,30	0,40	0,50	0,60	0,83	1,04	0,45	0,65	0,82	1,25	1,75	2,33
50	0,30	0,40	0,50	0,60	0,83	1,04	0,45	0,65	0,82	1,25	1,75	2,22
60	0,30	0,40	0,50	0,60	0,83	1,04	0,45	0,65	0,82	1,25	1,65	2,15
70	0,30	0,40	0,50	0,60	0,83	1,04	0,45	0,65	0,82	1,25	1,65	2,10
85	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	0,45	0,65	0,82	1,25	1,65	2,10

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)											
	2,94/0,3	3,92/0,4	4,90/0,5	5,88/0,6	7,84/0,8	9,81/1,0	3,92/0,4	5,88/0,6	7,84/0,8	11,8/1,2	15,7/1,6	19,6/2,0
	АР 42-12						АР 43-12					
	Ток статора I_1						Ток статора I_1					
10	2,71	2,73	2,76	2,80	—	—	3,40	3,44	3,50	—	—	—
20	2,71	2,72	2,74	2,77	2,84	2,96	3,40	3,43	3,46	3,64	3,95	—
30	2,71	2,71	2,72	2,77	2,82	2,91	3,40	3,43	3,46	3,60	3,86	4,32
40	2,71	2,71	2,72	2,75	2,80	2,89	3,40	3,43	3,46	3,60	3,83	4,24
50	2,71	2,71	2,72	2,75	2,80	2,89	3,40	3,43	3,46	3,60	3,83	4,22
60	2,71	2,71	2,72	2,75	2,80	2,89	3,40	3,43	3,46	3,60	3,83	4,16
70	2,71	2,71	2,72	2,75	2,80	2,89	3,40	3,43	3,46	3,60	3,83	4,16
85	2,71	2,71	2,72	2,75	2,80	2,89	3,40	3,43	3,46	3,60	3,82	4,13
	Ток ротора I''_2						Ток ротора I''_2					
10	0,25	0,37	0,48	0,60	—	—	0,32	0,55	0,77	—	—	—
20	0,25	0,33	0,42	0,51	0,73	0,97	0,32	0,53	0,70	1,13	1,70	—
30	0,25	0,33	0,39	0,50	0,67	0,88	0,32	0,50	0,67	1,04	1,50	2,05
40	0,25	0,33	0,39	0,50	0,67	0,86	0,32	0,50	0,67	1,00	1,40	1,92
50	0,25	0,33	0,39	0,50	0,67	0,86	0,32	0,50	0,67	1,00	1,40	1,83
60	0,25	0,33	0,39	0,50	0,67	0,85	0,32	0,50	0,67	1,00	1,37	1,78
70	0,25	0,33	0,39	0,50	0,67	0,85	0,32	0,50	0,67	1,00	1,37	1,66
85	0,25	0,33	0,39	0,50	0,67	0,85	0,32	0,50	0,67	1,00	1,33	1,62

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)							
	9,81/1,0	19,6/2,0	29,4/3,0	39,2/4,0	19,6/2,0	29,4/3,0	49,0/5	58,8/6
	АР 52-6				АР 53-6			
	Ток статора I_1				Ток статора I_1			
10	2,85	—	—	—	5,20	7,50	—	—
20	2,85	4,54	7,18	—	5,00	6,80	11,70	—
30	2,85	4,54	6,47	9,5	4,80	6,50	10,60	13,30
40	2,85	4,38	6,30	8,8	4,80	6,30	10,20	12,00
50	2,85	4,30	6,15	8,5	4,80	6,30	10,00	12,20
60	2,85	4,30	6,15	8,3	4,80	6,30	10,00	12,00
70	2,85	4,30	6,15	8,2	4,80	6,30	10,00	11,80
85	2,85	4,25	6,00	8,1	4,80	6,30	9,85	11,70
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2			
10	1,75	—	—	—	3,70	6,20	—	—
20	1,70	3,50	6,00	—	3,35	5,20	10,00	—
30	1,70	3,40	5,40	8,3	3,35	5,00	9,10	11,60
40	1,70	3,40	5,25	7,5	3,35	4,90	8,70	11,00
50	1,70	3,40	5,20	7,3	3,35	4,85	8,50	10,70
60	1,70	3,40	5,10	7,2	3,35	4,85	8,45	10,50
70	1,70	3,40	5,10	7,1	3,35	4,85	8,45	10,40
85	1,70	3,40	5,10	7,0	3,35	4,85	8,45	10,40

f, Гц	Значения I_1 и I''_2 А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)							
	9,81/1,0	19,6/2,0	29,4/3,0	39,2/4,0	19,6/2,0	29,4/3,0	49,0/5	58,8/6
	АР 52-8 Ток статора I_1				АР 53-8 Ток статора I_1			
10	2,70	—	—	—	4,80	6,26	—	—
20	2,70	3,70	5,85	—	4,80	6,00	9,40	—
30	2,70	3,70	5,30	—	4,80	5,74	8,73	10,80
40	2,70	3,70	5,20	7,30	4,80	5,74	8,52	10,40
50	2,70	3,70	5,05	6,86	4,80	5,74	8,40	10,20
60	2,70	3,70	5,05	6,80	4,80	5,74	8,40	10,10
70	2,70	3,70	5,05	6,60	4,80	5,74	8,26	9,86
85	2,70	3,70	5,05	6,50	4,80	5,74	8,26	9,86
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2			
10	1,30	—	—	—	2,55	4,30	—	—
20	1,10	2,60	4,70	—	2,40	3,70	7,40	—
30	1,10	2,50	4,10	—	2,40	3,60	6,70	8,70
40	1,10	2,50	3,90	5,80	2,40	3,60	6,40	8,20
50	1,10	2,50	3,87	5,60	2,40	3,60	6,35	7,90
60	1,10	2,40	3,80	5,45	2,40	3,60	6,35	7,90
70	1,10	2,35	3,70	5,30	2,40	3,60	6,35	7,90
85	1,10	2,35	3,70	5,25	2,40	3,60	6,35	7,90

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)							
	9,81/1,0	19,6/2,0	29,4/3,0	39,2/4,0	19,6/2,0	29,4/3,0	49,0/5	58,8/6
	АР 52-10				АР 53-10			
	Ток статора I_1				Ток статора I_1			
10	3,90	4,65	—	—	5,70	6,46	—	—
20	3,90	4,50	5,55	—	5,66	6,30	8,66	—
30	3,90	4,45	5,35	6,85	5,66	6,23	8,40	9,83
40	3,90	4,45	5,35	6,65	5,66	6,23	8,27	9,60
50	3,90	4,42	5,30	6,45	5,66	6,23	8,14	9,37
60	3,90	4,42	5,30	6,45	5,66	6,23	8,13	9,30
70	3,90	4,42	5,25	6,35	5,66	6,23	8,13	9,30
85	3,90	4,42	5,25	6,35	5,66	6,23	8,13	9,25
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2			
10	1,05	2,33	—	—	2,00	3,50	—	—
20	1,00	2,05	3,40	—	1,95	3,05	5,80	—
30	1,00	2,00	3,18	4,60	1,90	3,00	5,30	6,90
40	1,00	1,95	3,00	4,37	1,90	2,95	5,20	6,60
50	1,00	1,95	3,00	4,25	1,90	2,90	5,04	6,43
60	1,00	1,95	3,00	4,15	1,90	2,90	5,00	6,25
70	1,00	1,95	3,00	4,15	1,90	2,90	5,00	6,25
85	1,00	1,95	3,00	4,15	1,90	2,90	5,00	6,20

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)							
	9,81/1,0	19,6/2,0	29,4/3,0	39,2/4,0	19,6/2,0	29,4/3,0	49,0/5	58,8/6
	АР 52-12				АР 53-12			
	Ток статора I_1				Ток статора I_1			
10	4,45	4,90	—	—	7,50	7,95	—	—
20	4,45	4,80	5,62	—	7,45	7,85	9,40	—
30	4,45	4,80	5,55	6,83	7,45	7,85	9,33	10,45
40	4,45	4,80	5,50	6,68	7,45	7,80	9,28	10,25
50	4,45	4,80	5,50	6,60	7,45	7,80	9,25	10,15
60	4,45	4,80	5,50	6,55	7,45	7,80	9,20	10,10
70	4,45	4,80	5,50	6,45	7,45	7,80	9,15	10,00
85	4,45	4,80	5,50	6,40	7,45	7,80	9,15	10,00
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2			
10	0,85	2,05	—	—	1,75	2,90	—	—
20	0,85	1,80	3,00	—	1,73	2,60	4,80	—
30	0,80	1,65	2,70	4,10	1,65	2,50	4,47	5,70
40	0,80	1,65	2,62	3,80	1,65	2,45	4,35	5,45
50	0,80	1,60	2,53	3,65	1,65	2,45	4,25	5,30
60	0,80	1,60	2,53	3,55	1,65	2,45	4,20	5,25
70	0,80	1,60	2,47	3,45	1,65	2,45	4,20	5,20
85	0,80	1,60	2,47	3,43	1,65	2,45	4,20	5,20

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)									
	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	**19,6/2,0**	**39,2/4,0**	58,8/6	78,4/8	98,1/10	118/12
	АР 63-8				АР 64-8					
	Ток статора I_1				Ток статора I_1					
10	4,66	7,52	—	—	**5,7**	**7,6**	11,1	—	—	—
20	4,66	7,07	10,25	—	**5,7**	**7,6**	10,1	13,5	18,0	—
30	4,66	6,87	9,75	13,5	**5,7**	**7,4**	9,8	12,6	16,2	20,7
40	4,66	6,80	9,45	12,9	**5,7**	**7,4**	9,8	12,4	15,7	19,6
50	4,66	6,67	9,13	12,5	**5,7**	**7,4**	9,6	12,3	15,3	18,8
60	4,66	6,67	9,13	12,4	**5,7**	**7,4**	9,6	12,0	15,0	18,5
70	4,66	6,67	9,13	12,4	**5,7**	**7,4**	9,6	12,0	15,0	18,3
85	4,66	6,67	9,13	12,1	**5,7**	**7,4**	9,6	12,0	15,0	18,2
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2					
10	2,5	6,2	—	—	**2,5**	**5,4**	9,0	—	—	—
20	2,5	5,3	8,7	—	**2,5**	**5,0**	8,0	11,3	15,8	—
30	2,5	5,1	8,0	11,7	**2,5**	**4,8**	7,6	10,4	13,8	18,1
40	2,5	5,0	7,9	11,1	**2,5**	**4,8**	7,3	10,1	13,4	16,9
50	2,5	4,9	7,6	10,7	**2,5**	**4,8**	7,3	10,0	13,0	16,3
60	2,5	4,9	7,6	10,7	**2,5**	**4,8**	7,3	10,0	12,8	16,1
70	2,5	4,9	7,6	10,5	**2,5**	**4,8**	7,3	10,0	12,8	15,9
85	2,5	4,9	7,6	10,5	**2,5**	**4,8**	7,3	10,0	12,8	15,8

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)									
	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	98,1/10	118/12
	АР 63-10				АР 64-10					
	Ток статора I_1				Ток статора I_1					
10	5,6	7,1	—	—	6,7	7,7	10,0	—	—	—
20	5,6	6,8	9,1	12,6	6,7	7,7	9,4	11,7	14,8	—
30	5,6	6,8	8,9	11,6	6,7	7,7	9,4	11,4	14,2	17,5
40	5,6	6,8	8,7	11,3	6,7	7,7	9,4	11,3	13,8	16,6
50	5,6	6,8	8,6	11,0	6,7	7,7	9,4	11,2	13,5	16,2
60	5,6	6,8	8,6	10,9	6,7	7,7	9,4	11,2	13,4	16,0
70	5,6	6,8	8,6	10,9	6,7	7,7	9,4	11,2	13,3	15,8
85	5,6	6,8	8,6	10,7	6,7	7,7	9,4	11,2	13,3	15,7
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2					
10	2,0	4,6	—	—	2,0	4,4	7,1	—	—	—
20	1,9	4,2	6,8	10,2	2,0	4,0	6,1	8,8	11,9	—
30	1,9	4,0	6,3	9,1	2,0	4,0	5,9	8,2	11,0	14,1
40	1,9	4,0	6,2	8,7	2,0	4,0	5,9	8,0	10,5	13,3
50	1,9	3,9	6,0	8,5	2,0	4,0	5,9	8,0	10,4	12,9
60	1,9	3,9	6,0	8,4	2,0	4,0	5,9	8,0	10,1	12,5
70	1,9	3,9	6,0	8,3	2,0	4,0	5,9	8,0	10,1	12,4
85	1,9	3,9	6,0	8,2	2,0	4,0	5,9	8,0	10,1	12,4

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)									
	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	98,1/10	118/12
	АР 63-12				АР 64-12					
	Ток статора I_1				Ток статора I_1					
10	6,55	7,6	—	—	8,8	9,2	10,2	—	—	—
20	6,55	7,3	8,9	11,8	8,8	9,2	10,2	12,0	14,4	—
30	6,55	7,3	8,7	10,9	8,8	9,2	10,2	11,8	13,8	16,3
40	6,55	7,3	8,7	10,7	8,8	9,2	10,2	11,7	13,6	15,9
50	6,55	7,3	8,7	10,6	8,8	9,2	10,2	11,7	13,5	15,6
60	6,55	7,3	8,7	10,5	8,8	9,2	10,2	11,7	13,4	15,4
70	6,55	7,3	8,7	10,4	8,8	9,2	10,2	11,7	13,4	15,3
85	6,55	7,3	8,7	10,4	8,8	9,2	10,2	11,7	13,4	15,3
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2					
10	1,8	3,9	—	—	1,7	3,4	5,8	—	—	—
20	1,7	3,4	5,5	8,4	1,7	3,3	5,1	7,2	9,6	—
30	1,7	3,3	5,2	7,4	1,7	3,2	4,9	6,8	8,8	11,3
40	1,7	3,3	5,0	7,1	1,7	3,2	4,9	6,7	8,7	10,9
50	1,7	3,2	5,0	6,9	1,7	3,2	4,9	6,5	8,5	10,5
60	1,7	3,2	5,0	6,8	1,7	3,2	4,9	6,5	8,4	10,5
70	1,7	3,2	5,0	6,8	1,7	3,2	4,9	6,5	8,2	10,5
85	1,7	3,2	4,9	6,7	1,7	3,2	4,9	6,5	8,2	10,1

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)									
	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	98,1/10	118/12
	АР 63-16				АР 64-16					
	Ток статора I_1				Ток статора I_1					
10	9,05	9,5	—	—	12,0	12,2	12,8	—	—	—
20	9,05	9,4	10,0	11,3	12,0	12,2	12,6	13,4	14,6	17,8
30	9,05	9,4	10,0	11,2	12,0	12,2	12,6	13,4	14,5	16,0
40	9,05	9,4	10,0	11,1	12,0	12,2	12,6	13,4	14,5	15,8
50	9,05	9,4	10,0	11,0	12,0	12,2	12,6	13,4	14,5	15,8
60	9,05	9,4	10,0	11,0	12,0	12,2	12,6	13,4	14,5	15,8
70	9,05	9,4	10,0	11,0	12,0	12,2	12,6	13,4	14,5	15,8
85	9,05	9,4	10,0	11,0	12,0	12,2	12,6	13,4	14,5	15,8
	Ток ротора I''_2				Ток ротора I''_2					
10	1,30	2,8	—	—	1,3	2,6	4,3	—	—	—
20	1,25	2,6	4,0	5,8	1,3	2,5	3,9	5,4	7,20	9,7
30	1,25	2,5	3,9	5,4	1,3	2,5	3,7	5,2	6,70	8,4
40	1,25	2,5	3,8	5,2	1,3	2,5	3,7	5,0	6,50	8,1
50	1,25	2,5	3,7	5,1	1,3	2,5	3,7	5,0	6,45	7,9
60	1,25	2,5	3,7	5,1	1,3	2,5	3,7	4,9	6,25	7,7
70	1,25	2,5	3,7	5,1	1,3	2,5	3,7	4,9	6,25	7,6
85	1,25	2,5	3,7	5,1	1,3	2,5	3,7	4,9	6,25	7,6

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)										
	49,0/5	98,1/10	147/15	58,8/6	78,4/8	98,1/10	118/12	157/16	196/20	216/22	235/24
	АР 73-10			АР 74-10							
	Ток статора I_1			Ток статора I_1							
10	9,4	15,1	—	12,2	13,7	15,7	18,3	—	—	—	—
20	9,4	14,2	21,3	12,0	13,5	15,1	17,2	22,0	28,4	32,4	—
30	9,4	14,0	20,2	12,0	13,5	15,1	17,1	21,8	27,0	30,1	34,0
40	9,4	13,9	19,7	12,0	13,5	15,1	17,0	21,4	26,6	29,5	32,7
50	9,4	13,6	19,5	12,0	13,5	15,1	17,0	21,2	26,0	28,7	31,6
60	9,4	13,6	19,4	12,0	13,5	15,1	16,9	21,2	25,3	28,0	30,9
70	9,4	13,6	19,1	12,0	13,5	15,1	16,9	20,8	25,3	28,0	30,8
85	9,4	13,6	19,1	12,0	13,5	15,1	16,9	20,8	25,3	28,0	30,8
	Ток ротора I''_2			Ток ротора I''_2							
10	5,2	12,0	—	6,3	8,6	11,0	13,8	—	—	—	—
20	5,0	10,7	17,6	6,0	8,0	10,0	12,4	17,3	23,7	27,3	—
30	5,0	10,2	16,4	6,0	8,0	9,9	12,0	16,5	22,0	24,7	28,1
40	5,0	10,0	15,9	6,0	8,0	9,9	12,0	16,3	21,2	23,9	26,9
50	5,0	10,0	15,8	6,0	8,0	9,9	11,6	15,8	20,7	23,3	26,0
60	5,0	10,0	15,7	6,0	7,8	9,7	11,6	15,8	20,2	22,8	25,4
70	5,0	10,0	15,6	6,0	7,8	9,7	11,6	15,8	20,2	22,6	25,2
85	5,0	10,0	15,3	6,0	7,8	9,7	11,6	15,6	20,0	22,1	24,7

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках Н·м/(кгс·м)										
	49,0/5	98,1/10	147/15	58,8/6	78,4/8	98,1/10	118/12	157/16	196/20	216/22	235/24
	АР 73-12			АР 74-12							
	Ток статора I_1			Ток статора I_1							
10	10,2	14,7	—	14,0	14,8	16,0	17,9	—	—	—	—
20	10,2	13,4	19,6	14,0	14,8	16,0	17,4	21,2	26,0	29,5	—
30	10,2	13,4	18,7	14,0	14,8	16,0	17,4	20,8	24,9	27,7	30,5
40	10,2	13,4	18,2	14,0	14,8	16,0	17,4	20,6	24,4	25,7	29,3
50	10,2	13,4	18,0	14,0	14,8	16,0	17,4	20,6	24,4	26,6	28,9
60	10,2	13,4	17,9	14,0	14,8	16,0	17,4	20,5	24,0	26,1	28,4
70	10,2	13,4	17,8	14,0	14,8	16,0	17,4	20,5	24,0	26,0	28,2
85	10,2	13,4	17,7	14,0	14,8	16,0	17,4	20,5	24,0	26,0	28,1
	Ток ротора I''_2			Ток ротора I''_2							
10	4,5	10,5	—	5,1	7,0	9,1	11,5	—	—	—	—
20	3,9	8,6	14,8	5,0	6,8	8,6	10,4	14,5	19,5	22,4	—
30	3,9	8,5	13,8	4,8	6,4	8,1	10,0	13,8	17,9	20,2	23,0
40	3,9	8,2	13,4	4,8	6,4	8,1	9,8	13,5	17,4	19,5	21,9
50	3,9	8,2	13,0	4,8	6,4	8,1	9,8	13,3	17,2	19,2	21,3
60	3,9	8,2	12,9	4,8	6,4	8,1	9,8	13,3	17,0	19,0	21,1
70	3,9	8,2	12,6	4,8	6,4	8,1	9,8	13,3	16,8	18,9	20,9
85	3,9	8,2	12,4	4,8	6,4	8,1	9,8	13,3	16,8	18,6	20,6

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)										
	19,6/2	39,2/4	58,8/6	78,4/8	98,1/10	117,7/12	127,5/13	137,3/14	147,1/15	156,9/16	176,5/18
	АР 73-16										
	Ток статора I_1										
10	13,4	13,6	14,1	14,9	16,2	—	—	—	—	—	—
20	13,4	13,6	14,0	14,6	15,5	16,7	17,6	18,4	19,4	20,9	—
30	13,4	13,6	14,0	14,6	15,4	16,6	17,4	18,0	18,8	19,7	22,2
40	13,4	13,6	14,0	14,6	15,4	16,5	17,2	17,8	18,6	19,4	21,2
50	13,4	13,6	14,0	14,6	15,4	16,4	17,2	17,4	18,3	19,1	21,2
60	13,4	13,6	14,0	14,6	15,4	16,4	17,0	17,4	18,3	19,0	20,8
70	13,4	13,6	14,0	14,6	15,4	16,4	17,0	17,4	18,3	19,0	20,7
85	13,4	13,6	14,0	14,6	15,4	16,4	17,0	17,4	18,3	19,0	20,6
	Ток ротора I''_2										
10	1,2	2,6	4,0	5,6	7,7	—	—	—	—	—	—
20	1,2	2,6	3,9	5,2	6,7	8,3	9,1	10,2	11,3	12,6	—
30	1,2	2,6	3,8	5,0	6,5	8,0	8,7	9,5	10,4	11,3	13,6
40	1,2	2,6	3,8	5,0	6,3	7,8	8,4	9,1	9,9	10,7	12,8
50	1,2	2,6	3,8	5,0	6,3	7,7	8,3	9,0	9,8	10,5	12,3
60	1,2	2,6	3,7	5,0	6,2	7,6	8,2	8,9	9,6	10,4	12,2
70	1,2	2,6	3,7	5,0	6,2	7,4	8,1	8,8	9,4	10,3	12,0
85	1,2	2,6	3,7	5,0	6,2	7,4	8,1	8,8	9,4	10,2	11,7

f, Гц	Значения I_1 и I''_2, А, при нагрузках, Н·м/(кгс·м)											
	19,6/2,0	39,2/4,0	58,8/6	78,4/8	98,1/10	118/12	137/14	157/16	176/18	196/20	216/22	235/24
	АР 74-16											
	Ток статора I_1											
10	17,2	17,4	17,7	18,1	18,9	19,8	21,1	—	—	—	—	—
20	17,2	17,4	17,7	18,0	18,7	19,6	20,8	22,0	23,6	25,6	27,9	—
30	17,2	17,4	17,7	18,0	18,7	19,5	20,5	21,6	23,0	24,6	26,6	28,8
40	17,2	17,4	17,7	18,0	18,7	19,5	20,5	21,6	22,8	24,3	26,0	27,9
50	17,2	17,4	17,7	18,0	18,7	19,5	20,5	21,6	22,8	24,2	25,7	27,6
60	17,2	17,4	17,7	18,0	18,7	19,5	20,5	21,6	22,8	24,2	25,6	27,5
70	17,2	17,4	17,7	18,0	18,7	19,5	20,5	21,6	22,8	24,2	25,6	27,1
85	17,2	17,4	17,7	18,0	18,7	19,5	20,5	21,6	22,8	24,2	25,6	27,1
	Ток ротора I''_2											
10	1,0	2,2	3,4	5,1	6,8	8,5	10,2	—	—	—	—	—
20	1,0	2,2	3,4	4,9	6,2	7,7	9,2	10,9	12,5	14,4	16,5	—
30	1,0	2,2	3,4	4,8	6,0	7,5	8,8	10,3	11,8	13,6	15,4	17,5
40	1,0	2,2	3,4	4,8	6,0	7,4	8,8	10,1	11,5	13,2	14,7	16,6
50	1,0	2,2	3,4	4,8	6,0	7,4	8,6	10,0	11,2	13,0	14,5	16,3
60	1,0	2,2	3,4	4,8	6,0	7,4	8,6	10,0	11,2	12,8	14,3	16,0
70	1,0	2,2	3,4	4,8	6,0	7,4	8,6	10,0	11,2	12,7	14,1	15,6
85	1,0	2,2	3,4	4,8	6,0	7,4	8,6	10,0	11,2	12,6	14,0	15,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андреев В. П., Сабинин Ю. А.** Основы электропривода. Изд. 2-е, перераб., М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 772 с.
2. **Гак И.** Коэффициент теплоотдачи поверхности закрытых двигателей без наружной вентиляции. Перевод ЦБТИЭП—5258, 1959 г.
3. **Голован А. Т.** Основы электропривода. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959. 344 с.
4. **Ковач К. П., Рац И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
5. **Костенко М. П., Пиотровский Л. М.** Электрические машины. Ч. II. Л., «Энергия», 1973. 648 с.
6. **Краново-металлургические** электродвигатели. Под общей редакцией А. А. Рабиновича. М., «Энергия», 1967. 240 с.
7. **Кутателадзе С. С., Боришанский В. М.** Справочник по теплопередаче. Л.—М., Госэнергоиздат, 1959. 414 с.
8. **Методика** расчета экономической эффективности новой техники в машиностроении. Л., «Машиностроение», 1967. 499 с.
9. **Михеев И. И., Попов Г. И.** Смазка заводского оборудования. М., «Машиностроение», 1967. 499 с.
10. **Михеев М. А.** Основы теплопередачи. Изд. 3-е, перераб. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956. 392 с.
11. **Петров И. И., Мейстель Л. М.** Специальные режимы работы асинхронного электропривода. М., «Энергия», 1968. 264 с.
12. **Попов В. К.** Основы электропривода. М.—Л., Госэнергоиздат, 1951. 292 с.
13. **Типовая** методика определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР. Госплан, 1969. 16 с.
14. **Шнейдер П.** Инженерные проблемы теплопроводности. М., Изд-во иностр. лит., 1960. 478 с.
15. **Сонькин М. А.** Исследование индивидуального привода роликов рольгангов. ЦНИИТМАШ. Прокатные станы, кн. 80, вып. 7.
16. **Шмитц.** Известия завода «Саксенверк», вып. 2, 1937.
17. **Kausher W.** Rollgangsmotoren. Getriebe — Atlas. — «Die Maschine», 1964, Bd 18, № 1, S. 25—28.
18. **Praff G., Jordan H.** Dynamische Kennlinien von Drehstromasynchronmotoren. — «ETZ-A», Bd 83, H. 12, 1962.
19. **Wichler H.** Drehstrom-Kurschlusslaufermotoren für den Einzelantrieb von Arbeitsrollgangen. — «AEG-Mitteilungen», 1938, H. 10.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Степан Артемьевич Шелехов
Татьяна Степановна Шелехова

РОЛЬГАНГОВЫЕ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ
СЕРИИ АР

●

Редактор В. Я. Беспалов
Редактор издательства И. В. Антик
Обложка художника Е. В. Никитина
Художественный редактор Д. И. Чернышев
Технический редактор Л. А. Молодцова
Корректор И. А. Володяева
ИБ № 899

Сдано в набор 28/I 1977 г. Подписано к печати 11/VI 1977 г.
Т-11744 Формат 84×108[1]/32 Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 9,66 Уч.-изд. л. 9,90
Тираж 3000 экз. Зак. 40 Цена 50 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.